

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño de sistema de trituración para trituradora de plástico
de alta densidad**

Trabajo de graduación presentado por Andrea Mercedes Chinchilla
Linares para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,
2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño de sistema de trituración para trituradora de plástico
de alta densidad**

Trabajo de graduación presentado por Andrea Mercedes Chinchilla
Linares para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,
2023

Vo.Bo.:

(f) 
Ingeniero Rony José Herrarte Estevez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ingeniero Rony José Herrarte Estevez

(f) 
Ingeniero César Alberto Rosales Gómez

(f) 
Ingeniero Luis Diego Castañeda Fernández

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2023.

Lista de figuras	VII
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Problemática por resolver - Trituradora Agrequima	3
2.2. Antecedentes - Trituradora Agrequima	3
2.3. Sistema de cuchillas	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Marco teórico	11
5.1. Plásticos	11
5.2. Tipos de trituradoras	12
5.3. Sistemas de corte	13
5.4. Rotores	14
5.5. Diseño	15
5.6. Materiales	17
5.7. Diseño de cribas	18
5.8. Mantenimiento de cuchillas	19
6. Metodología	21
6.1. Requisitos	22
6.2. Diseño y cálculos	23
6.2.1. Diseños preliminares	23

6.2.2. Diseño final	24
6.2.3. Fuerza de corte	27
6.2.4. Configuración de simulación	28
6.2.5. Rodamientos	31
6.2.6. Lubricación de rodamientos	34
6.2.7. Tornillos de sujeción de cuchillas móviles	36
6.2.8. Factor de seguridad a la fatiga y fluencia cuchillas móviles	42
6.2.9. Tornillos de sujeción de cuchillas fijas	46
6.2.10. Factor de seguridad a la fatiga y falla por fluencia cuchillas fijas	48
6.2.11. Soldadura	49
6.3. Plan de fabricación y/o simulación	57
6.3.1. Fabricación	57
6.3.2. Manufactura	58
6.4. Protocolo de pruebas	60
6.4.1. Primera prueba	60
6.4.2. Segunda prueba	60
7. Resultados	63
7.1. Requisitos	63
7.2. Simulación en <i>software</i> ANSYS	65
7.3. Rodamientos	66
7.4. Tornillos de sujeción	66
7.5. Soldadura electrodo E100xx	68
7.6. Soldadura electrodo E60xx	68
7.7. Pruebas realizadas	69
7.8. Cotización	69
8. Análisis de resultados	71
9. Conclusiones	77
10.Recomendaciones	79
11.Bibliografía	81
12.Anexos	85
12.1. Manual de mantenimiento de trituradora de plástico HDPE	85
12.2. Planos de construcción de sistema de trituración	85

Lista de figuras

1. Tipos de rotores HERBOLD	14
2. Criba tipo media luna	18
3. Criba tipo plana	18
4. Criba tipo doble media luna	19
5. Diseño preliminar del sistema de trituración	23
6. Segundo diseño preliminar del sistema de trituración	24
7. Diseño final del eje de trituración	24
8. Dimensiones cuchillas móviles	25
9. Dimensiones cuchillas fijas	25
10. Diseño de porta cuchilla	26
11. Diseño de criba	26
12. Contactos tipo <i>bonded</i>	28
13. Tipos de soportes aplicados	29
14. Configuración soporte tipo <i>Cilindrical Support</i>	30
15. Configuración de fuerza en cuchillas móviles	30
16. Mallado eje cuchillas móviles	31
17. Ubicación de las fuerzas de reacción en el eje	31
18. Intervalo de relubricación	35
19. Factor de concentración tensión o compresión simple con agujero transversal	40
20. Casos de soldadura	50
21. Sistema de trituración	57
22. Esfuerzo von Mises máximo $5.07 MPa$ en eje de trituración	65
23. Deformación máxima $0.03 mm$ en eje de trituración	65
24. Deformación máxima $0.01 mm$ en eje	65
25. Factor de seguridad eje de trituración	66

1. Propiedades mecánicas de varios tipos de plástico	11
2. Guía para selección de tipo de trituración	12
3. Requisitos	22
4. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino	37
5. Clases métricas de propiedad de pernos, tornillos y birlos de acero	38
6. Factores del par de torsión K para varios tipo de acabado de pernos	38
7. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin	44
8. Factor por carga	44
9. Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero	45
10. Factores de confiabilidad k_e	45
11. Esfuerzos permisibles, Código AISC	51
12. Propiedades mínimas de electrodos	51
13. Factores de concentración del esfuerzo, K_{fs}	54
14. Lista de partes de sistema de trituración	57
15. Material para eje	58
16. Material para porta cuchilla	58
17. Material para cuchilla móvil	59
18. Material para cuchilla fija	59
19. Material para seguro	59
20. Material para criba	59
21. Equipo para prueba 1	60
22. Equipo para prueba 2	60
23. Cumplimiento de requisitos	63
24. Vida nominal de rodamientos escogidos	66
25. Horas de vida de rodamientos escogidos	66
26. Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en cuchillas móviles	66
27. Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en seguro	67
28. Factor de seguridad a la fatiga y fluencia de tornillos en cuchillas móviles	67
29. Esfuerzos en tornillos sometidos a cortante en cuchillas fijas	67
30. Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en lámina	67
31. Factor de seguridad a la fatiga y fluencia de tornillos en cuchillas fijas	67

32. Esfuerzos aplicados y permisibles en material de aporte y base	68
33. Factores de seguridad	68
34. Esfuerzos aplicados y permisibles en material de aporte y base	68
35. Factores de seguridad	68
36. Factor de seguridad al aumentar RPM del motor	69
37. Factor de seguridad al cambiar material de porta cuchillas y eje	69
38. Cotización de materiales para módulo de cuchillas	69
39. Cotización de materiales para los tres módulos	70
40. Cotización de trituradora completa	70

Agrequima es una empresa dedicada a la recolección y correcto procesamiento de envases de pesticidas y plaguicidas, utilizados en el área agrícola. Los envases recolectados son fabricados con polietileno de alta densidad (HDPE). Para el procesamiento de estos envases la empresa cuenta con una trituradora la cual fue importada de China. Actualmente se tiene poca información de los componentes, repuestos y mantenimiento de esta.

Por esto el objetivo fue el diseño y fabricación de una trituradora para plástico de alta densidad con una capacidad de 150 kg/h y que tuviera un costo menor a \$12,000. Se estableció que se trabajaría en el módulo de sistema de trituración. Se definió que se diseñaría un sistema de cuchillas fijas y móviles. El diseño cuenta con 10 cuchillas en total, 4 fijas y 6 móviles realizadas con acero AISI D2. Estas se colocan en un eje con 6 porta cuchillas soldadas a este. Para ambos elementos se define el acero AISI 1045 como el material a usar.

Se determinó la fuerza de corte necesaria y aplicada a las distintas piezas que componen el sistema y a través de un análisis de elementos finitos, se obtuvo que se tenía un factor de seguridad mayor a 15 en todas las piezas. Esto se debe a que los esfuerzos eran pequeños comparado con las resistencias de los materiales escogidos para los componentes.

Se realizaron análisis de fatiga para los tornillos de sujeción de las cuchillas así como también para la soldadura. Respecto a los tornillos se definió que todos serían M22 grado 8.8 y se cuenta con 3 tornillos por cada cuchilla móvil y 4 por cada cuchilla fija. En cuanto a la soldadura, se utiliza un electrodo E6011. Obteniendo los factores de seguridad, estos estaban por encima de 1.5. Para los tornillos se obtuvo un valor de 1.84 para las cuchillas móviles y fijas. En cuanto a la soldadura se tiene un factor de seguridad a la fatiga de 109 y 405 para la fluencia. Debido a esto se concluye que ningún elemento fallará ni por los esfuerzos generados ni por fatiga.

Por último, se estableció que, al cotizar los materiales necesarios, en el módulo de cuchillas se tenía 2/3 del presupuesto y esto sin tomar en cuenta manufactura, transporte, etc. Considerando los costos de los 3 módulos se definió que esta no se fabricaría en este momento. Se definieron 3 establecimientos donde se puede fabricar la máquina y se hace entrega de un juego de planos completo y también un manual de mantenimiento por si se fabrica en un futuro.

Este proyecto se trabajó con la empresa Agrequima. Esta es una empresa con una variedad de programas que promueven la unificación del gremio agrícola. Uno de estos es el programa Campo Limpio, que se dedica a la recolección de envases agroquímicos y pesticidas para ser reciclados ya que una gran cantidad de estos no son desechados correctamente.

Los materiales más recolectados en los centros de acopio de esta empresa son el tereftalato de polietileno (PET) y polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés). Estos deben ser triturados para poder ser reciclados posteriormente. Como parte del programa se cuenta con una trituradora utilizada principalmente para el plástico HDPE. Para hacer el proyecto autosostenible la empresa quería otra trituradora para este mismo material.

El diseño de la nueva trituradora se dividió en tres módulos y este proyecto se enfoca en el módulo del sistema de trituración del material. La trituradora actual fue obtenida de China por lo cual la empresa no cuenta con acceso a información sobre manuales y componentes importantes. Actualmente utilizan dos *sets* de cuchillas incluidas al momento de la compra de la máquina, pero no se tiene información sobre estas y se tienen problemas con el reemplazo de las cuchillas y el tiempo que estas mantienen el filo.

Para estos problemas se estableció que algunos de los aspectos más importantes a considerar en el diseño es la definición correcta del sistema de corte que se utiliza dependiendo el material a triturar, las propiedades del plástico que se desea triturar, el material de todos los componentes del sistema de trituración, la geometría de las cuchillas y su configuración, los esfuerzos aplicados a las distintas piezas y el mantenimiento que se le debe de dar a cada componente para el correcto funcionamiento de estos.

2.1. Problemática por resolver - Trituradora Agrequima

Agrequima es una empresa que se dedica a la recolección de envases que son utilizados en el área agrícola, como envases de pesticidas y/o plaguicidas. Este tipo de envases agroquímicos después de haber sido utilizados debe tener un manejo responsable incluyendo el transporte, almacenamiento, aplicación, disposición de envases vacíos, productos no usados y vencidos.

Debido a esto Agrequima dirige un proyecto llamado Campo Limpio con el cual están buscando una manera de poder hacerlo autosostenible por medio de una segunda trituradora para plástico de alta densidad (HDPE), la cuál sea más eficientes en términos de combustible y con un costo menor a \$12,000.

2.2. Antecedentes - Trituradora Agrequima

El tema de la recolección de envases ha ido tomando importancia conforme el tiempo. En los años 90's empezó una iniciativa llamada "Campo Limpio" en Brasil y Guatemala la cual tiene como finalidad afianzar el compromiso y la activa participación de todos los sectores de la cadena agrícola en el proceso de disposición adecuada de los envases para ampliar la cobertura y aumentar la cantidad de material. (CropLife, [s.f.](#))

El principal problema para este tipo de industrias y las razones por la cual no utilizan este tipo de materiales biodegradables para el uso de envases es por el tipo de químico que llevan dentro. Los envases deben cumplir con la certificación UN que garantiza que este envase puede contener productos peligrosos y ser transportado con seguridad por vía terrestre, marítima y aérea sin riesgos aparentes. (MaxiPet, [s.f.](#))

Hay que tener en cuenta en primer lugar, que los envases utilizados con este fin son de

un solo uso, y por esta razón es que se realiza el triple lavado para que los envases ya no representen algún peligro para los agricultores, medio ambiente o seres vivos. (MaxiPet, [s.f.](#)) Este consiste en lavar el envase con 3 enjuagues consecutivos. Para realizar un enjuague se agrega agua hasta 1/4 del envase, este se cierra y se agita durante 30 segundos. El contenido se vierte en el tanque de fumigación y el envase se deja escurrir durante 30 segundos antes de continuar con el próximo enjuague. (CropLife, [s.f.](#))

El único manejo responsable que se les ha podido dar es clasificar el tipo de envases si puede ser triturado o compactado para usarlos como materia prima que produzcan nuevos productos o si es necesario incinerarlos por ser materiales peligrosos. (MaxiPet, [s.f.](#)) En diversos países se realizan diferentes tipos de trituradoras para plástico, principalmente porque se busca la manera de darle un mejor manejo a los materiales y ver de qué manera pueden ser reutilizados.

En la Universidad Cooperativa de Colombia se realizó una trituradora específicamente para el plástico PET debido a que, aunque se recicla del 20 al 35 % de este plástico, en la Universidad no se lleva a cabo ningún modelo de gestión de residuos sólidos por lo que el PET generado no está siendo reciclado. A pesar de ser diseñada para plástico PET también puede triturar polipropileno, polietileno y poliéster. (Vela y col., [2018](#))

Para la realización de esta máquina utilizaron planos de libre acceso, en la cual se indican las dimensiones de cada pieza y los componentes mecánicos y eléctricos del modelo. Se basa en el tamaño de una botella plástica mediana estándar. La trituradora diseñada por esta Universidad cuenta con cuatro partes: Caja de cuchillas, estructura, suministro de poder y tolva. (Vela y col., [2018](#))

Al momento de fabricarla se debieron realizar ciertos ajustes en cada parte debido a los materiales disponibles. También se estableció que se podría triturar botellas más grandes que las mencionadas anteriormente, pero era necesario cortarlas para la facilidad de trituración. El costo de la fabricación de esta máquina fue de cuatro millones de pesos colombianos (\$ 4,000,000) lo cual es aproximadamente siete mil ochocientos quetzales (Q. 7,800) (Vela y col., [2018](#))

En general se pudo encontrar que se han realizado una gran variedad de trituradoras para plásticos, pero la mayoría se enfoca en el material tipo PET, aunque sí hay trituradoras para algunos plásticos de alta densidad como la realizada en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia específicamente para los residuos sólidos de la ciudad de Ibagué. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

La trituradora diseñada se hizo para el plástico ABS el cual es un polímero más fuerte que el PET y que se utiliza para aplicaciones electrónicas, sector automotriz y juguetes. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

Para la realización de esta máquina se tomó en cuenta la capacidad y la cantidad de residuos sólidos que se presentan en la ciudad, así como también el crecimiento de los desechos conforme pasa el tiempo. También, por el enfoque en el ABS, para el diseño de la máquina se tomó en cuenta los mejores materiales para este tipo de plástico, la cantidad de cuchillas por eje, tipo de corte, fuerza necesaria para corte, tipo de motor, reducciones de velocidad, acoples del sistema completo, etc. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

2.3. Sistema de cuchillas

La trituradora de HDPE con la que actualmente cuenta Agrequima tiene un sistema de cuchillas hechas de acero. Estas deben ser cambiadas y afiladas cada dos meses y este proceso resulta complicado y lleva tiempo. Se menciona que este tipo de cuchillas no pueden atrapar el plástico que se ingresa inmediatamente por lo que hay una gran cantidad de ruido que puede resultar molesto para los trabajadores. Es necesario tener un sistema de trituración que sea más duradero que el que se tiene actualmente, así como también que sea fácil de cambiar y afilar de ser requerido.

En cuanto al sistema de trituración se encontró que el sistema de cuchillas, realizado por la Universidad Cooperativa de Colombia, contaba con tres partes importantes: cuchillas y espaciadores, eje de trituradora y armazón de la caja. Se tiene una parte superior e inferior de las cuchillas y se estableció que el material utilizado fue acero laminado, pero este no permite un afilado permanente así que, entre mayor uso de la trituradora, se va perdiendo el filo y es necesario que el motor entregue mayor potencia. (Vela y col., 2018)

En el diseño de este sistema también se incluye una criba la cual es la que define el tamaño de las hojuelas de plástico. Se establece que en las cuchillas solamente se puede ingresar plástico ya que si entra metal esto puede dañar el sistema. También se menciona que las cuchillas no siempre agarran bien el material por lo cual es necesario empujar para lograr que comience a triturar. (Vela y col., 2018)

En cuanto al mantenimiento, es necesario revisar constantemente el estado de las cuchillas para afilarlas, también se deben limpiar (incluyendo la criba), después de cada trituración para eliminar cualquier tipo de residuo que haya podido quedar en estas partes de la máquina. (Vela y col., 2018)

En la Universidad Nacional del Centro de Perú también se realizó una trituradora para botellas tipo PET en la cual se quería diseñar un “prototipo de trituradora cuya geometría de cuchilla de corte permita mejorar el rendimiento de trituración de botellas tipo PET”. Se decidió utilizar una cuchilla con 3 uñas, aunque se tenían 4 tipos. (Gamarra y col., 2017)

- Tipo A: cuchilla de corte de 9 uñas paralelas al eje de rotación
- Tipo B: 3 cuchillas de corte paralelas al eje de rotación
- Tipo C: cuchilla de corte de 3 uñas de discos independientes
- Tipo D: 3 cuchillas de corte de 6 uñas de discos independientes

Para decidir cual se iba a utilizar se realizaron cálculos de análisis de varianza ANOVA para corroborar el flujo másico en kg/h de cada cuchilla y así establecer cuál dio el mejor rendimiento.

Determinaron que el mejor sistema era el de cuchillas cortadoras tipo C ya que esta presentaba un mayor rendimiento comparado con los otros tipos y se decidió utilizar cuchillas rotatorias debido a que según Freire y González, son las más comunes para maquinas molidoras de plástico. (Gamarra y col., 2017)

También se realizó un estudio de una trituradora en la Universidad técnica de Ambato en la cual se mencionan varios tipos de trituradoras, entre ellas se encuentran máquinas cortadoras rotativas, rodillos dentados, martillos y molino de discos. (Chimborazo, [2016](#))

Se menciona una trituradora con cuchillas CentriCut, para botellas de polietileno tereftalato (PET). Con estas se obtiene el material triturado de buena calidad que se puede utilizar para una nueva transformación inmediata. Se utiliza una criba y se tiene un sistema de aspiración para obtener el plástico triturado. (Chimborazo, [2016](#))

Las cuchillas están hechas de acero y se colocan en un porta cuchillas específico, en este se montan tres a cinco filas de cuchillas y luego se ingresa a la cámara de trituración en donde se encuentran cuatro filas de cuchillas fijas. El cambio de estas cuchillas se hace retirando el porta cuchillas completo y se sustituye por uno nuevo para poder realizarlo más rápidamente. (Chimborazo, [2016](#))

En el estudio realizado se menciona que el material que se utiliza para el sistema de trituración es acero rápido, debido a su alta resistencia al revenido, desgaste y pérdida de dureza en caliente. Se mencionan tres tipos de aceros, Bohler S500, Bohler S600 y Bohler S705. (Chimborazo, [2016](#))

El acero rápido también es llamado acero de alta velocidad, HSS por sus siglas en inglés, el cual es un grupo de aceros aleados de alta resistencia utilizado para la fabricación de herramientas. (Orozco, [2019](#))

Las herramientas para la trituración deben tener una forma adecuada con filos y ángulos bien seleccionados para reducir gastos y pérdida de tiempo. (Chimborazo, [2016](#))

Se habla de una trituradora con cuchillas montadas sobre dos ejes, uno de estos gira en sentido contrario para lograr el corte y cizalladura. Las cuchillas fueron hechas de acero AISI D3 de dureza HRe66. Los ejes se realizaron de acero AISI 1018 HR. (Chimborazo, [2016](#))

En la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia se realizó un sistema de trituración con cuchillas rotativas en el cual se basaron en la resistencia al impacto del polímero porque sirve para medir cuanta energía se necesita para poder cortar el plástico. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

La caja de trituración fue realizada con dos ejes que giran en sentido contrario para hacer el corte más eficiente. El ensamble de las cuchillas se realizó en eje hexagonal para facilitar el montaje. Cada cuchilla tenía un corte cada 90° por lo que por una revolución del eje se realizaban 4 cortes. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

Se menciona que, en trituradoras de potencia para materiales duros, el corte más usado es el helicoidal. Para esto colocaron 20 cuchillas en cada eje y estas estaban desfazadas cada 90°. Utilizan un volante de inercia para almacenar energía cinética. Este lo utilizan para brindar energía mecánica al eje cada 90° y así garantizar el funcionamiento correcto y continuo de la máquina. Se establece que entre las cuchillas se utilizan separadores para evitar la acumulación del material entre ellas. (Hernández & Fonseca, [2017](#))

Justificación

En Guatemala, el 65 % de envases de pesticidas y agroquímicos son recolectados para evitar el mal manejo de este tipo de desechos debido a una iniciativa de 1988 con el nombre de Limpiemos nuestro campo, actualmente esta es llamada Campo Limpio. En el sector agrícola, se trata de dar la mayor cantidad de capacitaciones posibles a los agricultores, aunque aún faltan muchas personas por ser capacitadas, debido a esto no hay 100 % de conciencia sobre el manejo responsable que se les debe de dar a estos desechos.

Teniendo esto en cuenta se sabe que gran cantidad de envases no son desechados correctamente, contaminando el medio ambiente y poniendo en peligro la vida de seres vivos. (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2019) Solo en 2018 hubo 375 casos de intoxicación teniendo un aumento del 67 % con respecto al año anterior de casos debido a las malas prácticas y mal manejo de estos desechos (Ola, 2019)

Hasta el momento el único manejo que se le da a este tipo de desechos es clasificarlo según si puede ser triturado o compactado para usarlo como materia prima o si es necesario incinerarlos por ser material peligroso. (MaxiPet, s.f.)

Debido a esta problemática social que se da en Guatemala se trabajará con la empresa Agrequima que se encarga de dar un buen manejo a los desechos del sector agrícola. Se creará un manual de fabricación, uso y mantenimiento de la trituradora para que esta pueda ser fabricada de ser necesario.

Con esta máquina se busca contrarrestar la contaminación del medio ambiente, y evitar que se ponga en peligro la vida de seres vivos por intoxicaciones al darle un nuevo uso a estos desechos. Esta trituradora será implementada en el centro de acopio de la empresa que más desechos recibe para poder optimizar el proceso de reciclaje y apoyar a que su proyecto se vuelva autosostenible.

El proyecto se realizará con 3 módulos, que son estructura, sistema de cuchillas y sistema de potencia, con una limitación de \$12,000 para la construcción de la trituradora. Esta debe contar con un sistema de cuchillas resistente y duradero ya que es necesario que corte de

manera eficiente los envases de polipropileno de alta densidad para poder transformarlo en hojuelas que se puedan reciclar y utilizar por otras empresas para darle un nuevo uso y así también contribuir a la reducción del nivel de contaminación por los envases de pesticidas.

4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de trituración para la trituradora de plástico de polietileno de alta densidad con cuchillas que mantengan el filo por al menos 2 meses.

4.2. Objetivos específicos

- Definir el tipo de cuchillas a utilizar que sea apto para el corte del plástico polietileno de alta densidad.
- Determinar el diseño de las cuchillas para disminuir desgaste de estas.
- Diseñar planos del sistema de cuchillas de la trituradora.
- Realizar manual de mantenimiento y uso de los sistemas de la trituradora para plástico polietileno de alta densidad
- Establecer forma de afilado y reemplazo de cuchillas dentro del manual.

5.1. Plásticos

Los productos plásticos consisten en polímeros de alto peso molecular que se pueden incorporar con otras sustancias para darle la funcionalidad que se requiera y para darle otras propiedades. Entre estos productos se tienen dos tipos de plástico principalmente: termoplástico y termoestable. (Wong y col., 2021) Solamente el termoplástico es reciclable ya que tiene enlaces moleculares más débiles por lo que es más fácil de romper. El termoestable es un polímero que solamente se puede calentar y moldear una vez. Si se calientan nuevamente se queman. (INIFINITA, 2022)

Hay siete tipos de plástico: Tereftalato de polietileno (PET o PETE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Cloruro de polivinilo (PVC), Polietileno de baja densidad (LDPE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y otros plásticos que no entran en estas categorías. (Wong y col., 2021)

Cuadro 1: Propiedades mecánicas de varios tipos de plástico

Material	Densidad (g/cm^3)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)
HDPE	0.959	1.08	26.2 - 33.1	22.1 - 31.0
LDPE	0.925	0.172 - 0.282	9.0 - 14.5	8.3 - 31.4
PET	1.35	2.76 - 4.14	59.3	48.3 - 72.4
PS	1.05	2.28 - 3.28	-	35.9 - 51.7
PP	0.905	1.14 - 1.55	31.0 - 37.2	31.0 - 41.40
PVC	1.30 - 1.58	2.41 - 4.14	40.7 - 44.8	40.7 - 51.7

Fuente: (Wong y col., 2021)

Se establece que el HDPE tiene propiedades similares al polietileno de baja densidad (LDPE). Tiene una resistencia al impacto relativamente alta y esta se mantiene a temperaturas bajas (GoodFellow, s.f.). Esta resistencia, según el método ISO se encuentra en un rango de 2.77 a 80.1kJ/m².

5.2. Tipos de trituradoras

Se establece que las trituradoras se pueden clasificar en 4 grupos los cuales son:

- **Trituración primaria o gruesa:** trituradoras de mandíbula o giratorias
- **Trituración secundaria o intermedia:** trituradoras giratorias, de reducción, cónicas, de disco y de rodillo
- **Trituración fina:** molinos de mazos
- **Usos especiales:** trituradoras de rodillos dentados y de martillos

En el Cuadro 2 se muestra una guía de selección de trituradora apropiada para cada material

Cuadro 2: Guía para selección de tipo de trituración

Material	Tritrador de mandíbula	Molino de rotor	Molino de cuchilla	Molino de discos	Molino de bolas
Materiales de construcción	X			X	X
Suelos, lodos de calificación	O			X	O
Productos químicos	O	X	O	O	X
Basura electrónica			O		X
Vidrio, cerámica	X		O	X	X
Madera, papel	O		X	O	O
Plásticos, cables, hule			X		O
Minerales, piedras	X	O		X	X
Producto farmacéutico		X	O	O	X

Fuente: (Miranda, 2014)

Respecto a la trituradora de mandíbula se tienen 3 grupos: Blake, Dodge y Excéntrico Superior. Estas trituradoras tienen una abertura para poder realizar productos más gruesos o finos dentro de ciertos límites. Se establece que estas comprimen el material no realizan

corte de este. En el Cuadro 2 se establece que no es recomendable para triturar el plástico. (Miranda, 2014)

Se tienen las trituradoras de rodillos las cuales consisten en dos cilindros que giran uno hacia el otro, de manera que atrapan el material y lo descargan por la parte de abajo. La molienda se realiza a presión. Se establece que el radio de reducción es bajo ya que no es práctico fabricar rodillos de pequeña curvatura (gran diámetro) sin incrementar en gran manera el peso de la máquina. Esto dificulta la construcción. (Miranda, 2014)

Están las trituradoras de martillos las cuales se pueden utilizar para materiales secos y húmedos, así como también materiales duros o frágiles. Tienen una mayor fuerza al impacto en la periferia de la cámara de trituración. (Chimborazo, 2016) Se basan en el principio de la transformación de la fuerza del golpe en trabajo de trituración. No se hace corte del material si no que se comprime el cuerpo más allá del límite de elasticidad. (Miranda, 2014)

También se encuentran las trituradoras de corte las cuales cuentan con un rotor de corte y se utiliza para materiales blandos, elásticos y fibrosos. Puede triturar muchos tipos de muestras en una sola operación sin previa trituración. Dentro de la caja de trituración se cuenta con cuchillas móviles (rotor) y fijas al igual que un tamiz (criba) (Miranda, 2014)

Otro tipo determinado es el molino de discos el cual cuenta con dos cilindros enfrentados y se conectan a dos motores independientes. Este tipo de igual forma funciona por medio de la compresión del material por lo que no corta el plástico. (Chimborazo, 2016) Debido a esto tampoco se recomiendan para la trituración de plástico como se define en el Cuadro 2

También se establece que según Adepo y Obanoyen los tipos comunes de trituradoras para plástico son de un eje, de múltiples ejes, de alta velocidad con poco torque o de baja velocidad con alto torque. (Adepo & Obanoyen, 2017) Hernández también menciona que la trituradora con eje doble brinda mayor precisión de corte en el material plástico. En este caso los ejes giran en sentido contrario lo cual hace que el corte del material sea más eficiente. (Hernández & Fonseca, 2017)

5.3. Sistemas de corte

Existen varios tipos de sistemas de corte, uno de ellos son dos ejes con las cuchillas distribuidas. Las ventajas de este es que tiene una mayor fuerza de corte debido a la presión entre cuchillas. Hay menor recirculación del material debido a cuantas cuchillas se encuentran en los ejes. Las desventajas es que la separación entre las cuchillas debe ser adecuada para que no haya fricción. Si una cuchilla tiene un fallo es necesario reemplazar la fresa completa. Es complejo fabricar este tipo de cuchillas. (Caviedes, 2020)

Otro tipo de sistema es un eje con cuchillas desfasadas, en este tipo se pueden colocar injertos en las puntas y la distribución es de forma helicoidal. Las ventajas de este sistema es que las cuchillas son intercambiables y tiene mejor recirculación debido a la forma de las cuchillas. Las desventajas es que es complejo fabricarlas, si a las cuchillas les falta filo hay acumulación de material, tienen un costo elevado de mantenimiento y se necesita una gran cantidad de cuchillas. (Caviedes, 2020)

El otro sistema es un eje con doble cuchilla tipo flecha el cual mantiene el material lejos de las paredes laterales de la caja de trituración. Las ventajas de este sistema es que son fáciles de fabricar, reduce desgaste en las paredes, las cuchillas son intercambiables, son de bajo costo y la distancia de corte es constante. La desventaja de este tipo es que hay cierta probabilidad de desajuste. (Caviedes, 2020)

Otra manera es que las cuchillas se colocan de forma descentrada ya que empujan de mejor manera las piezas en la cámara de corte. Esto permite una distribución uniforme de fuerza de corte y corte de tijera lo cual ahorra energía y el trabajo es más silencioso. (Alvarado y col., 2021)

Se puede encontrar también un eje con cuchillas distribuidas a lo largo de este y están separadas 180° entre si. Este representa una alta facilidad para afilar y para mantenimiento. Debido a la soldadura, en caso se dañe una cuchilla, es necesario el reemplazo completo del mecanismo eje y cuchillas. (Capelo & Velasco, 2021)

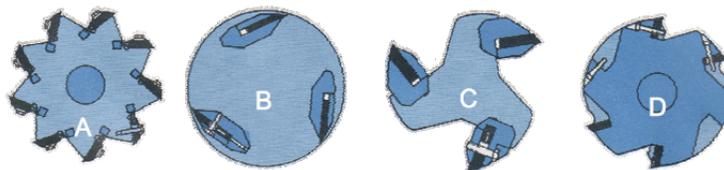
Según Raji, las cuchillas fijas y rotativas han sido la configuración más utilizada por muchos diseñadores para poder aumentar el rendimiento de la máquina. Para lograr que la trituradora sea más eficiente debe haber un gran enfoque en el sistema de accionamiento. (Raji y col., 2020)

5.4. Rotores

Hay 3 tipos de rotores: abierto, cerrado y escalonado. El abierto se utiliza para moler resinas sensibles al calor o materiales calientes. El cerrado tiene un montaje más resistente y agrega inercia al corte y los rotores escalonados se utilizan para cortar paredes más gruesas. Se establece que un rotor helicoidal segmentado tiene una combinación de los rotores cerrados y abiertos por lo cual proporcionan más corte. (Millones, 2014)

Según León, García y Ramos, dependiendo el tipo de material a moler y la presentación se selecciona el tipo de rotor. Este menciona que según el fabricante de molinos HERBOLD, este recomienda que para materiales de alto impacto o muy pesado se utiliza el rotor tipo A mostrado en la Figura 1. Para hule sin vulcanizar o materiales de bajo punto de fusión se utiliza el rotor tipo B. En el caso de materiales de alto punto de fusión se recomienda el tipo C y para distintos montajes de cuchillas para gran variedad de materiales se sugiere el tipo D.

Figura 1: Tipos de rotores HERBOLD



Fuente: (León y col., 2012)

5.5. Diseño

Se establece que el concepto de diseño de una máquina trituradora consiste en las mismas partes. Este contiene el módulo de cuchillas, potencia, tolva y estructura. El diseño de trituradoras de plástico se enfoca más en el reciclaje de HDPE, PET Y PP y se establece que los plásticos con propiedades mecánicas elevadas provocan un mayor esfuerzo en la máquina. (Wong y col., 2021)

Según el diseño realizado por García, la molienda del plástico se realiza dentro de un molino de cuchillas giratorias, las cuales Trituran el material hasta que se convierte en hojuelas con dimensiones específicas. Las cuchillas están unidas a unos porta cuchillas y estos se unen al eje rotatorio por medio de cuñas. El eje se coloca sobre un par de chumaceras y a un extremo tiene acoplado un volante de inercia para moderar fluctuaciones de velocidad al momento de triturar. También establece que para obtener las dimensiones exactas de las hojuelas es necesario incluir al sistema una criba. Esta determina las dimensiones de las hojuelas trituradas. (J. M. García y col., 2011) Si el plástico no pasa por los orificios es necesario que las cuchillas lo agarren nuevamente para continuar con la trituración hasta que alcancen el tamaño debido. (L. García y col., 2014)

Para el diseño del sistema de trituración es importante comenzar obteniendo las propiedades del material que se desea cortar, específicamente la resistencia al corte. También se necesita conocer la resistencia última a la tensión con la cual se puede obtener la resistencia al corte por cizalladura con la siguiente ecuación. (Alvarado y col., 2021)

$$\tau = \frac{4}{5} * \sigma \quad (1)$$

Teniendo las propiedades también se debe considerar la geometría que se le quiere dar a las cuchillas, específicamente para el diseño de estas. El diseñador puede escoger la cantidad de dientes que tiene la cuchilla y normalmente para trituradoras industriales, las cuchillas tienen de 1 a 3 dientes o de 9 a 12 así como también se colocan en ejes hexagonales. (Dattatraya & Manoj, 2020)

Se fabrican ejes hexagonales porque esto permite que las cuchillas se mantengan fijas en el eje y evitar el deslizamiento sobre este, pero también se menciona que fabricar este tipo de ejes causa que los costos sean más elevados por lo que hay otro tipo de soluciones para el deslizamiento. (Bravo, 2017) Como ejemplo, en las cuchillas de una trituradora de plástico, específicamente en el radio interior de estas, se colocaron pequeños dientes para evitar que estas roten y se deslicen sobre el eje. (AlBahrani y col., 2020)

Con respecto al corte de material se sabe que solamente ocurre cuando la fuerza de las cuchillas es mayor que la fuerza de desgarre del material. (AlBahrani y col., 2020) Se ha mencionado que en las cuchillas se puede colocar una punta de carburo para mejorar la acción de corte. Esto debido a que las puntas de carburo, tienen mayor filo y una vida más larga. (Nikitha y col., 2020)

Debido a lo mencionado anteriormente es importante conocer la resistencia al impacto y la temperatura a la cual se derrite el material. Teniendo esto se puede obtener la fuerza necesaria para hacer fallar el material. La fuerza se descompone en fuerza normal y tangencial y para los cálculos se asume que la rotación es constante. (Alvarado y col., 2021)

Una forma de encontrar la fuerza de corte es utilizando solamente el eje y teniendo en consideración distintos factores que actúan en el, como en el caso de la trituradora analizada por David y Oluwayomi, la tensión en las bandas, el peso de las poleas, el torque y momentos flectores. Teniendo esto en cuenta se realiza un diagrama de cuerpo libre el cual provee la fuerza de corte. (Atadious & Oyejide, 2018)

También se puede utilizar la resistnecia al impacto Izod del material y el espesor máximo a cortar para calcular la fuerza de corte necesaria como lo muestra la siguiente ecuación

$$F_c = R_{izod} * ec \quad (2)$$

Donde F_c es la fuerza de corte, R_{izod} es la resistencia al impacto Izod del material y ec es el espesor máximo del material a cortar. (Mayorga, 2016)

Aryani, Buchori y Budi establecieron que se puede encontrar el torque necesario antes de obtener el motor. Para esto se calcula la fuerza necesaria para el corte del material para la cual utilizaron el grosor de este, el ancho de una cuchilla y la resistencia la tracción. (Aryani y col., 2019)

$$F_c = S_{ut}at \quad (3)$$

Donde S_{ut} es la resistencia última a la tracción del material, a es el ancho de la cuchilla y t es el espesor del material a cortar.

Según García, Ponce, Martínez y León, obtener el peso de las cuchillas es de suma importancia para seleccionar el motor ya que este dato permite calcular el torque necesario (L. García y col., 2014) También se menciona que es importante obtener la capacidad y la eficiencia de la trituración. (Atadious & Oyejide, 2018)

La capacidad de trituración por revolución se puede obtener con la siguiente ecuación

$$C_{(t/r)} = 4A_c * N_e * N_c * t_c * \rho \quad (4)$$

Donde $C_{t/r}$ es la capacidad de corte por revolución de la máquina, A_c es el área de corte de la cuchilla, N_e es el número de ejes, N_c es el número de cuchillas, t_c es el espesor de las cuchillas y ρ es la densidad del material que se desea cortar. (Hernández & Fonseca, 2017)

Teniendo esto se puede calcular la capacidad general de trituración con la siguiente ecuación

$$C_{ap} = e * C_{(t/r)} * n \quad (5)$$

Donde C_{ap} es la capacidad general de trituración en kg/h , e es la eficiencia del motor y n es la velocidad angular con la que gira el eje y las cuchillas. (Hernández & Fonseca, 2017)

Para una trituradora PET, realizando distintas pruebas, se determinó que al reducir las revoluciones por minuto (RPM) del motor, las hojuelas de plástico producidas eran menores pero la capacidad de trituración era mayor que utilizando RPM más elevadas para el sistema de cuchillas. (Ayo y col., 2017)

En general se sabe que las cuchillas son un elemento que se debe poder reemplazar debido a que estas se desgastan o pueden tener otro tipo de problemas, es por eso que es necesario evitar las soldaduras de cuchillas ya que se tiene que poder removerlas de ser necesario. (Nikitha y col., 2020)

Teniendo los datos pertinentes mencionados anteriormente se utiliza un software de simulación para determinar esfuerzos y factores de seguridad. Esta simulación ayuda a verificar que el diseño sea correcto. (Ogunedo & Chuckwudi, 2020)

Se realiza un análisis de elementos finitos para determinar que la elección de material y geometría sea la correcta para las cuchillas de las trituradoras. Se realizó un análisis en unas cuchillas para determinar el esfuerzo Von Mises, desplazamiento y factor de seguridad para el cual se utilizó la fuerza de corte aplicada. (Mayorga, 2016)

5.6. Materiales

Se establece que en la empresa de materias primas de Granma se utilizan cuchillas fabricadas de acero de baja aleación 60Mn (AISI 1070), con un tratamiento térmico formado por temple en aceite a 830°C para poder obtener alta dureza y resistencia mecánica. Luego se sigue con un revenido medio a 480°C para obtener una micro estructura y propiedades óptimas pudiendo alcanzar una dureza de 269HB . (Canals, 2012)

Se realizaron análisis entre dos materiales para cuchillas que tenían la misma geometría. Se hizo el estudio con una cuchilla de acero AISI 1045 y una de D6AC. Se les aplicó una fuerza de $8,835\text{N}$ a ambas y utilizando elementos finitos se definieron los esfuerzos generados en cada una. Se concluyó que la mejor opción para fabricarlas es utilizar el acero AISI 1045 debido a que al utilizar este material no se tenía un sobredimensionamiento como se tenía con el material D6AC el cual contaba con una resistencia mucho mayor comparado con el otro material. (Pedraza y col., 2018)

Para las cuchillas del diseño de una trituradora realizada en Quito, se decide utilizar acero ASSAB DF2 (AISI 01). Este es un acero endurecido en aceite de uso general y muy versátil debido a que contiene carbono, manganeso, cromo y wolframio. Este es adecuado para la fabricación de herramientas con buena vida útil y economía de producción. Se decide utilizar este material ya que las cuchillas son piezas que se someten a esfuerzos de impacto continuamente. (Vásconez, 2013)

En el caso del diseño de una máquina trituradora de botellas plásticas realizada en Perú se utilizó acero AISI D2. Esto debido a que era necesario un material con alto porcentaje de carbono y cromo. También debe tener alta tenacidad. Se establece que las aplicaciones para este material es en herramientas de roscado, insertos para moldes, trituradoras de llantas, cuchillas, cizallas, cuchillas para trituración de plástico, etc. (Monteza, 2019)

En el diseño la trituradora de Quito mencionada anteriormente, en el eje de trituración se decide utilizar acero AISI 1045. Este es un acero que se caracteriza por buena soldabilidad, buena maquinabilidad, resistencia y propiedades de impacto. Se suele aplicar en engranajes, cigüeñales, ejes, pernos, cadenas, etc. Este material se usa en el eje debido a que este es la que se somete a grandes cantidades de esfuerzo ya que se tiene el peso de los porta cuchillas, las

cuchillas y los esfuerzos de impacto que se generan durante el corte de material. (Vásconez, 2013)

5.7. Diseño de cribas

Se encuentran 3 tipos de diseños de cribas. Primero se tiene la criba de media luna. Esta presenta una pequeña holgura con las cuchillas por lo que permite que se recoja el material que todavía no tiene el tamaño correcto. Con esta geometría no hay una acumulación del plástico en ningún punto y por lo tanto no se desperdicia material.

Figura 2: Criba tipo media luna

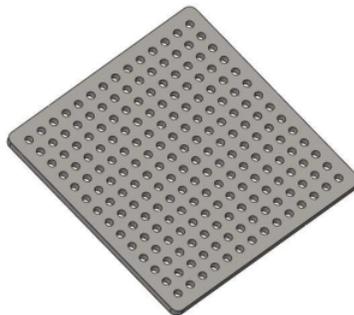


Fuente: (Vásconez, 2013)

Una desventaja de este tipo es que la distancia entre la criba y las cuchillas debe ser bien definida para lograr la recirculación correcta del material. Es importante mantener una separación uniforme entre todas las cuchillas del eje.

El segundo tipo es la criba plana. La fabricación de esta es relativamente fácil al igual que el montaje y desmontaje. Las operaciones de mantenimiento en estas son sencillas por lo que no se requiere personal muy calificado. (Vásconez, 2013)

Figura 3: Criba tipo plana



Fuente: (Vásconez, 2013)

Algunas desventajas de este tipo de criba es que existirá material que tape la tamizadora (criba) en los extremos más lejanos al eje o ejes. Esto provoca que no se aproveche

completamente y tampoco se permite la recirculación de material por lo que podría causar taponamientos en la criba. (Vásconez, 2013)

Por último, se tiene la criba de doble medialuna. Esta es similar a la criba de media luna por lo que tiene las mismas ventajas que esta. La diferencia es que esta se utiliza cuando se tienen dos ejes de trituración. (Vásconez, 2013)

Figura 4: Criba tipo doble media luna



Fuente: (Vásconez, 2013)

Adicional a las desventajas que comparte con la criba de tipo media luna esta también se considera que tiene una mayor dificultad de fabricación, montaje y alineación. La unión entre las cribas puede llegar a constituir un lugar de acumulación de material (Vásconez, 2013)

5.8. Mantenimiento de cuchillas

Se tiene el mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo. Según Valdes el mantenimiento predictivo son tareas de seguimiento del estado y desgaste de una o más piezas o componentes de equipos prioritarios a través de análisis de síntomas o análisis por evaluación estadística, que determinen el punto exacto de sustitución. El mantenimiento preventivo son actividades que se realizan en equipos, instalaciones o construcciones para poder garantizar que la calidad del servicio de estos continúe dentro de los límites establecidos. Por último, el mantenimiento correctivo son actividades realizadas en equipos, instalaciones o construcciones cuando, a consecuencia de una falla, han dejado de tener la calidad de servicio esperada. (Valdés Atencio & San Martín Pacheco, 2009)

El módulo de eje y cuchillas tiene un efecto importante en la eficiencia de la máquina y se establece que estas requieren un mantenimiento regular debido al desgaste del material durante el proceso de trituración. (Wong y col., 2021) Es importante realizar revisiones e inspecciones del estado de las cuchillas al inicio y al final de su ciclo de trabajo como parte del mantenimiento preventivo de estas. (Hernández & Fonseca, 2017)

El desgaste en las cuchillas provoca que se tenga una mayor distancia o luz entre las cuchillas lo cual implica que hay un aumento de consumo de energía de la trituradora. Esto se puede dar por el desgaste mencionado o por un mal ajuste de cuchillas. Como consecuencia de esto hay un mal corte del material y por lo tanto las hojuelas trituradas no tienen la

calidad esperada. (Canals, 2012)

Según Canals, la duración del filo de las cuchillas varía en función del tipo de material y el grado de suciedad de este. Triturar materiales muy sucios provoca un acelerado desgaste de las cuchillas y esto tiene como consecuencia una caída en la producción. Se menciona que algunas soluciones es utilizar un ángulo de corte adecuado. Para las cuchillas móviles se recomienda un ángulo entre 40 y 45° y en el caso de cuchillas fijas se establece que estas deben tener un ángulo menor o igual a 15° debido a que estas reciben la mayor cantidad de golpes (en reciclaje de plástico, 2019). También se establece que al momento de afilar las cuchillas siempre mantener el ángulo original de corte y se debe tener un montaje y ajuste de cuchillas sencillo para lo cual se pueden seccionar las cuchillas para que el montaje y desmontaje sea menos complicado. (Canals, 2012)

Se establece que en cada cambio de cuchillas, antes de desmontarlas es necesario realizar la limpieza de la caja de trituración para evitar que algún material pueda dañar las distintas piezas. Es necesario revisar que las cuchillas no estén fracturadas, se deben limpiar las cuchillas y soportes utilizando un cepillo o brocha. También es importante revisar la rosca de los tornillos de fijación y se establece que para apretar se utiliza un *ratchet* y luego un torquímetro para el apriete final. (Recimex, 2015)

También se menciona que cada semana, se debe revisar que ninguno de los tornillos de sujeción estén flojos, y se debe lavar y limpiar el interior de la caja de trituración utilizando agua. Es importante que cada 3 meses se refresquen las roscas de los soportes de las cuchillas utilizando un machuelo y aceite para lubricar. En este tiempo también se debe sustituir algún tornillo o roldana dañada. (Recimex, 2015)

El diseño y fabricación de la trituradora para plástico polietileno de alta densidad se divide en tres módulos

- Estructura
- Sistema de potencia
- Sistema de trituración

Con respecto al sistema de trituración, el diseño y fabricación de este se divide en cinco etapas. La primera etapa es previa al diseño del sistema en el cual se investigó sobre sistemas de cuchillas para trituradoras de plástico, se establecieron los componentes necesarios y cómo funcionan. Sabiendo esto se investigó específicamente sobre las cuchillas para el corte de plástico, sus aplicaciones y cuál es el rendimiento de estas. Por último, se identificaron posibles proveedores de los componentes necesarios para realizar la caja de trituración.

La segunda etapa consistió en definir los requisitos que debe cumplir tanto la trituradora como el sistema de cuchillas. En esta etapa se definió el presupuesto para la realización de la máquina, la capacidad mínima de esta y se estableció el tiempo de trabajo continuo de la trituradora. También se determinó el espacio que ocupa la caja de trituración y cada cuánto se deben reemplazar las cuchillas.

La tercera etapa consistió en el diseño del sistema. Durante esta etapa se debe seleccionar el material apto para tener la mejor resistencia de las cuchillas, así como también el material para el eje y componentes. Con respecto a las cuchillas se definió la geometría y la forma de corte que provea el mejor corte del plástico polietileno de alta densidad. Se estableció la fuerza necesaria para cortar el plástico y con esto se realizó el análisis de esfuerzo y factor de seguridad de las cuchillas para determinar que el diseño sea correcto. También fue

importante definir la geometría del eje donde se colocan las cuchillas y realizar un análisis de esfuerzos para comprobar que el diseño sea correcto.

Para los análisis fue necesario realizar iteraciones para llegar el diseño que cumpla con los requisitos establecidos anteriormente. Teniendo esto se estableció la forma de ensamble de la caja de trituración y la forma de reemplazo de las cuchillas. Se definió la vida útil de las cuchillas para determinar si cumple con los requisitos y por último se realizaron los planos de la caja de trituración.

En la etapa cuatro se fabricarían las piezas para el sistema para el cual se realizaría un presupuesto de la fabricación completa de la caja de trituración. Con esto, luego, se fabricarían las cuchillas definidas en el diseño, así como también el eje de cuchillas. Se obtendrían los componentes para los ejes, se ensamblarían las cuchillas y luego se ensamblaría la caja de trituración para después colocarla en la estructura de la trituradora. Se prepararía un protocolo de pruebas y luego estas se realizarían para determinar el funcionamiento óptimo del sistema.

La última etapa consistió en realizar el manual de mantenimiento de la trituradora. Se definió el mantenimiento correcto de las cuchillas y del módulo de estructura y potencia para poder realizar un manual de mantenimiento al respecto.

6.1. Requisitos

Cuadro 3: Requisitos

Área	Código	Requisito
Sistema de trituración	ST - 01	El sistema debe cortar plástico HDPE
	ST - 02	El sistema debe cortar mínimo 150 kg/h
	ST - 03	El sistema debe tener un costo menor o igual a \$4,000
	ST - 04	Se debe presentar un manual de fabricación completo del sistema de trituración
	ST - 05	Se debe presentar un manual de mantenimiento correcto del sistema de trituración
	ST - 06	Las cuchillas deben poder cortar una caneca de 20 L hecha de HDPE
Diseño y fabricación	DF - 01	El factor de seguridad del sistema debe ser mayor a 2.5
	DF - 02	El ancho de la caja de trituración no debe exceder 1.5 m
	DF - 03	El sistema de trituración debe ser fabricado con materiales que se puedan conseguir localmente
	DF - 04	Las cuchillas deben ser fabricadas de acero
	DF - 05	Los porta cuchillas deben ser fabricados de acero
	DF - 06	El eje debe ser fabricado de acero
	DF - 07	Se debe tener un factor de seguridad a la fatiga en los tornillos de sujeción mayor a 1.5

Área	Código	Requisito
Diseño y fabricación	DF - 08	Se debe tener un factor de seguridad a la fatiga mayor a 3 en las uniones realizadas por soldadura
	DF - 09	La deformación máxima del sistema de trituración debe ser menor a 1.5 mm
Funcionamiento	FN - 01	El tamaño de la hojuela triturada debe ser de 18 mm o menor
Seguridad	SG - 01	Se debe indicar el torque necesario para la sujeción de tornillos de cuchillas en el manual de mantenimiento

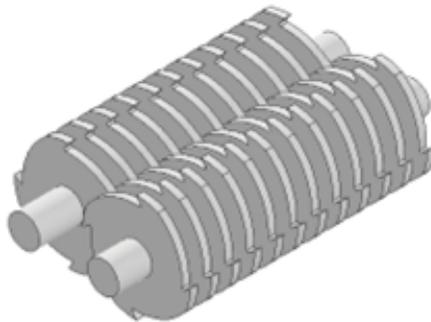
Fuente: (Elaboración propia)

6.2. Diseño y cálculos

6.2.1. Diseños preliminares

Para el sistema de trituración se realizaron dos diseños preliminares. El primero se hizo siguiendo el diseño de una trituradora de doble eje. En el primer diseño, presentado en la Figura 5, se utilizaron dos ejes los cuales, cada uno tenía doce cuchillas con cuatro filos cada una.

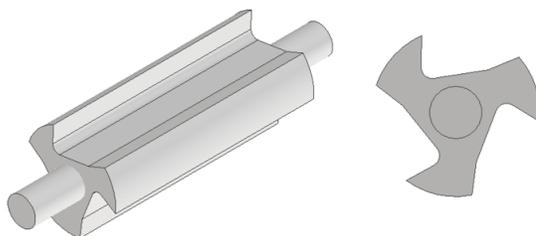
Figura 5: Diseño preliminar del sistema de trituración



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

Después de realizar este diseño se tomó en cuenta que, para realizar el mantenimiento a este tipo de sistema, en caso ser necesario reemplazar alguna cuchilla, se debe quitar el eje completo y luego se deben desensamblar todas las cuchillas que estuvieran delante de la que se debe reemplazar. Esto provoca que el tiempo de reemplazo de las cuchillas sea elevado. También se tomó en consideración que para este tipo de sistema de trituración es necesario utilizar una criba de medialuna doble lo cual representa las desventajas presentadas en la sección 5.7 del marco teórico.

Figura 6: Segundo diseño preliminar del sistema de trituración



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

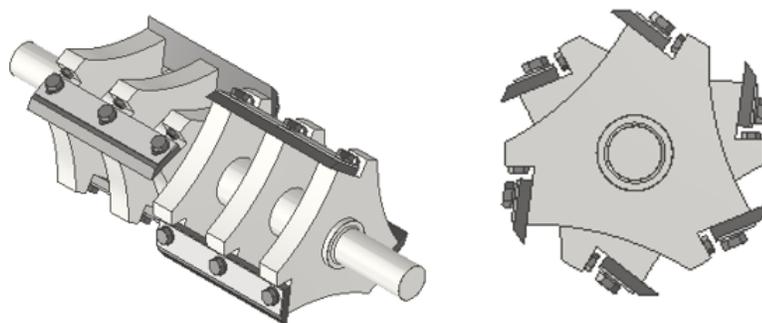
El segundo diseño realizado se basa solamente en un eje de cuchillas rectas. Este se presenta en la Figura 6. Se observa que en este se espera tener 3 cuchillas móviles a lo largo del porta cuchillas. Se define por motivos de mantenimiento de cuchillas y ajuste de estas, es mejor que estas se encuentren seccionadas. También se establece que es más beneficioso tener un desfase entre cuchillas por lo que este diseño no sería eficiente.

6.2.2. Diseño final

Se decidió cambiar el tipo de sistema base para hacer el diseño final. Tomando en cuenta las consideraciones de mantenimiento y efectividad mencionadas anteriormente, para el diseño final del sistema de trituración se decidió utilizar un sistema de cuchillas fijas y móviles ya que esto permite que, haya una mayor facilidad de montaje y desmontaje al igual que de ajuste. También al tener un ángulo de desfase se garantiza que en un mismo instante, están cortando dos cuchillas. También se utilizó como referencia la trituradora actual que maneja la empresa.

Esta trituradora tiene diez cuchillas en total por lo que en este caso se decidió mantener la misma cantidad realizando seis cuchillas colocadas en el eje y dos pares de cuchillas colocadas en la estructura. Se utilizó el software Autodesk Inventor® para modelar las distintas piezas necesarias para el sistema de trituración. El diseño final de este se presenta a continuación.

Figura 7: Diseño final del eje de trituración



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

Este está compuesto por un eje de acero AISI 1045, seis porta cuchillas del mismo material y seis cuchillas fabricadas de acero AISI D2 el cual es especial para la realización de estas piezas debido a la alta resistencia al desgaste, tenacidad, alta dureza y estabilidad dimensional posterior al tratamiento.(Tecniaceros, [s.f.](#))

Se utilizan 18 tornillos M22 x 2.5 x 90 grado 8.8 para la sujeción de las cuchillas móviles, específicamente 3 por cuchilla para disminuir el movimiento de estas en el momento del impacto con el material. En el sistema de trituración actual se utiliza un seguro sobre las cuchillas por lo que para el diseño final se coloca una placa de acero sobre las cuchillas y que, de igual manera, esta sujetado por los tornillos mencionados. Este se coloca para poder tener una mejor sujeción de las cuchillas y así prevenir el movimiento de estas.

Para la sujeción de las cuchillas fijas se utilizan 16 tornillos M22 x 2.5 x 50 grado 8.8 y como se observa en la Figura [8](#), se tienen cuatro agujeros para cada cuchilla por lo que se considera que no es necesario el uso de una placa como seguro para prevenir el movimiento de estas al momento del impacto con el material. También es importante mencionar que la geometría de los agujeros se debe a que esto permite mover las cuchillas, tanto hacia adelante como hacia atrás, para lograr un buen ajuste de las cuchillas cada vez que sea necesario.

Se tienen diseños similares para las cuchillas fijas y para las móviles. En ambos se decide utilizar cuchillas rectas que funcionen en cizalla. La diferencia se encuentra en el ángulo de corte, el ancho de la cuchilla y en los agujeros para la sujeción. Para realizar el diseño se tomó como referencia diseños actuales de cuchillas que se utilizan para este tipo de molinos, así como también el diseño de la trituradora actual de la empresa.

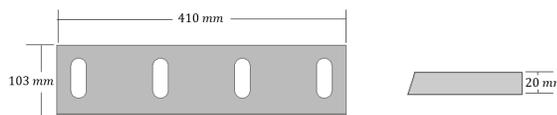
En la Figura [8](#) se observa que las cuchillas móviles tienen un ángulo de corte más pronunciado que las cuchillas fijas mostradas en la Figura [9](#). Esto se debe a que, al tener este tipo de ángulo en el filo, se reduce la cantidad de fuerza que debe hacer la cuchilla para poder cortar el material. También se tiene en consideración que esta es la cuchilla que tiene el primer contacto con el material por lo que debe penetrarlo de manera fácil y rápida.

Figura 8: Dimensiones cuchillas móviles



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.)

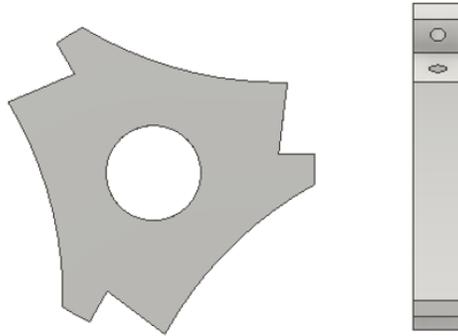
Figura 9: Dimensiones cuchillas fijas



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.)

Para el diseño de los porta cuchillas se tuvo en cuenta distintas consideraciones. La parte donde se colocan las cuchillas debe tener espacio para poder mover la cuchilla hacia adelante o hacia atrás. Para lograr ajustarlas de esta manera se decidieron utilizar tornillos M18 x 2.5 x 35 y se colocan en el agujero superior del porta cuchillas que se muestra en la Figura 10. Con respecto a la curva que se observa en la geometría, se decidió colocarla debido a que reduce la cantidad de material necesario en cada porta cuchilla por lo cual el peso total del eje con porta cuchillas es menor.

Figura 10: Diseño de porta cuchilla

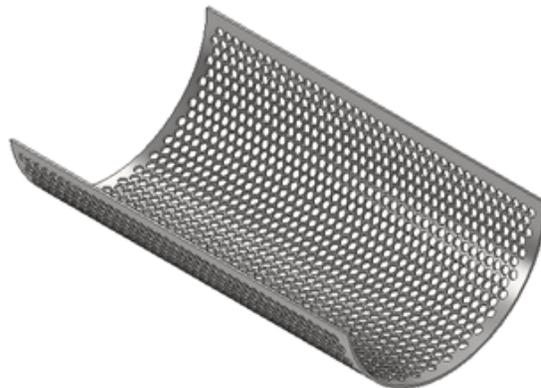


Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

En la superficie donde se colocan las cuchillas se tiene un ángulo el cual se colocó por motivos de ensamble en la caja de cuchillas ya que, sin este ángulo, al colocar la criba, los pernos utilizados para la sujeción tendrían contacto con este elemento lo cual causaría daños tanto en la criba como en los pernos y cuchillas.

También se diseñó la criba de la trituradora, el material elegido para esta es lámina de acero A36 debido al costo del material y que este no es un elemento al que se le aplican cargas elevadas y por lo tanto no sufre de esfuerzos significativos. Los agujeros tienen 18 mm de diámetro ya que es el tamaño máximo que las hojuelas de plástico deben tener.

Figura 11: Diseño de criba



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

6.2.3. Fuerza de corte

Para las piezas más importantes se realizaron distintos cálculos de esfuerzos, para estos era necesario obtener la fuerza que iba a actuar en estas. Primero se calculó la fuerza necesaria para romper el material y esto se hizo utilizando la siguiente ecuación (Mayorga, 2016)

$$F_c = R_{Izod} * ec \quad (6)$$

Donde F_c es la fuerza de corte, R_{Izod} es la resistencia al impacto Izod y ec es el espesor máximo a cortar

Para determinar la fuerza se obtuvo la resistencia al impacto Izod del plástico de alta densidad (HDPE) y este tiene un valor de 80.1 kJ/m^2 como se observa en la sección 5.1 del marco teórico. También se determinó el espesor de las paredes del recipiente que se desea triturar el cual es de 3 mm . Al aplicar la ecuación anterior se obtuvo un valor de

$$R_{Izod} = 80.1 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} * \frac{1000 \text{ Nm}}{1 \text{ kJ}}$$
$$R_{Izod} = 80,100 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Cálculo de fuerza

$$F_c = 80,100 \frac{\text{N}}{\text{m}} * 0.003 \text{ m}$$
$$F_c = 240.3 \text{ N}$$

A esta fuerza se le aplica un factor de seguridad de 2.5 el cual se determinó utilizando el método de Mott en el cual se establece que para carga dinámica con confianza promedio en datos y cálculos de diseño, los valores se encuentran entre 2 y 2.5. Aplicando este, la fuerza de corte que se necesitaría es de

$$F_c = 600.75 \text{ N}$$

Luego de tener esta fuerza se calculó la fuerza real que se iba a tener en el eje, esto se realizó utilizando el torque que el sistema de potencia le entregará al sistema de cuchillas. Se sabe que el torque se puede obtener de la siguiente manera:

$$T = Fr \quad (7)$$

Despejando esta se obtiene la fuerza

$$F = \frac{T}{r} \quad (8)$$

Para esta trituradora se tiene un torque de 294.492 Nm después de aplicarle un factor de seguridad de 1.1 debido a las variaciones que puede haber en el motor. El radio que hay desde la cuchilla hasta el centro del eje es de 235.489 mm . Se utiliza esta medida debido a que esta es la distancia que hay desde el eje de rotación hasta la línea de acción de la fuerza. Se obtuvo una fuerza real de

$$F = \frac{249.492 \text{ Nm}}{0.2355 \text{ m}}$$

$$F = 1250.55 \text{ N}$$

Se aproxima a

$$F = 1250 \text{ N}$$

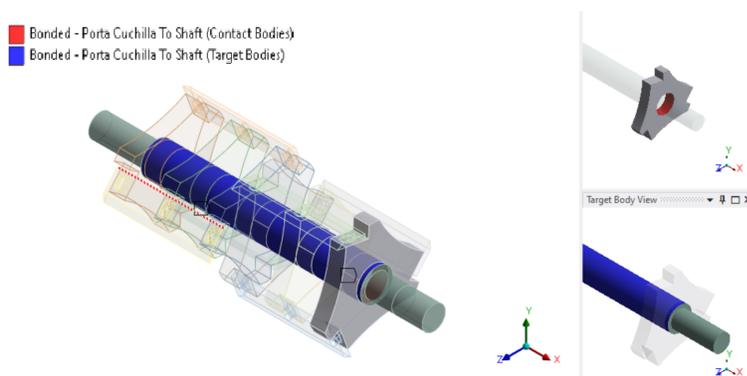
6.2.4. Configuración de simulación

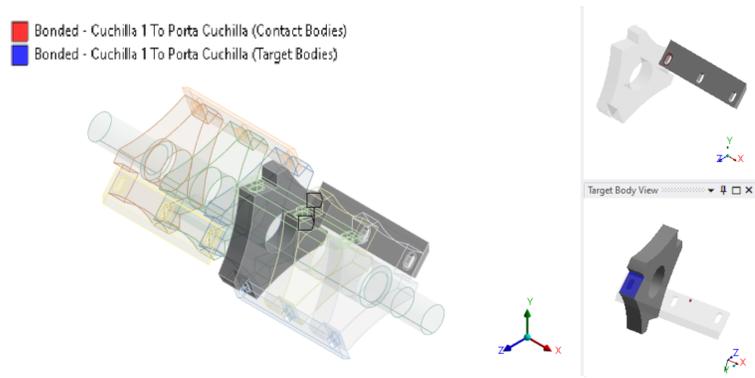
Teniendo esta fuerza se determinaron los esfuerzos en el eje, las cuchillas y los porta cuchillas haciendo un análisis estático estructural. Esto se realizó por medio del software ANSYS debido a la complejidad de las geometrías. En este programa se determinó el esfuerzo máximo, el desplazamiento máximo de las piezas y el factor de seguridad al aplicar la carga de 1250 N en las cuchillas que estarán cortando en un mismo instante. Estos se muestran en la sección de resultados.

Antes de realizar el análisis fue necesario realizar ciertos cambios en la geometría. En el eje se eliminaron los chaflanes que tenía en los bordes del hombro, así como también al inicio y final del eje. También se eliminaron los tornillos con sus agujeros debido a que el análisis de estos se realizará utilizando otro método. Se eliminaron los seguros sobre las cuchillas ya que estos no tendrían cargas significativas por lo cual no es necesario analizar este tipo de piezas. Esto hace que la simulación sea más simple y fácil de realizar sin comprometer los resultados. Otro cambio realizado fue un *face split* en uno de los extremos del eje para poder aplicar 2 tipos de soportes en esta área.

Para configurar la simulación se definieron ciertos contactos entre las piezas. En el contacto del eje con los porta cuchillas se utilizó el tipo *bonded* debido a que estos elementos estarán soldados por lo que no hay movimiento. En el caso del contacto entre las cuchillas y los porta cuchillas, se tiene una superficie alrededor del agujero la cual tiene un contacto *bonded* con el porta cuchillas.

Figura 12: Contactos tipo *bonded*

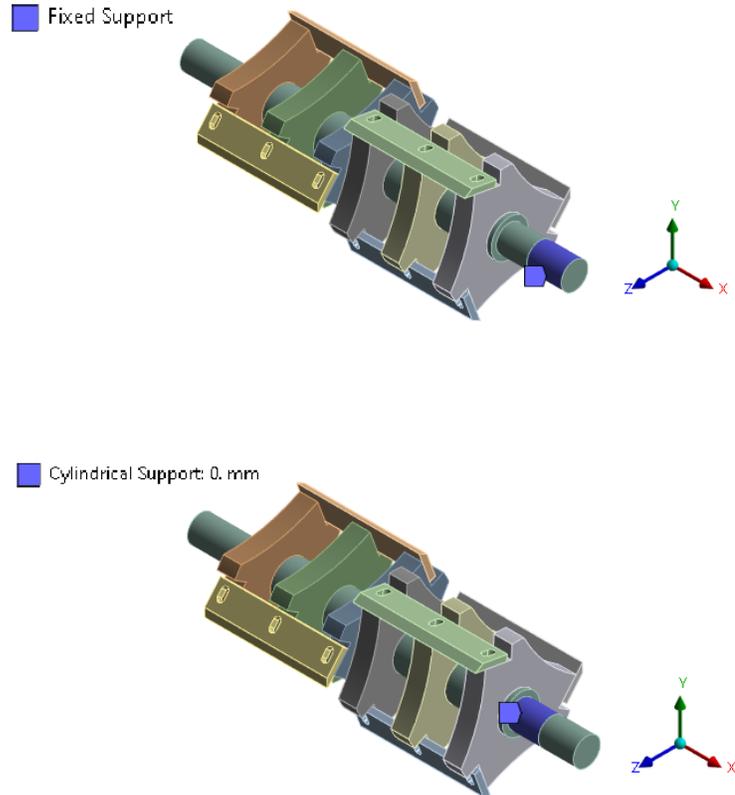




Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc)

En cuanto a los soportes, se tienen dos de tipo *cilindrical support* y uno tipo *fixed*. Este último se aplicó debido a que es un análisis estático por lo que es necesario tener una superficie fija. El primer soporte se colocó ya que se está analizando un eje y este tipo permite la simulación de rotación dependiendo de la configuración que se tenga. En este caso la dirección tangencial se colocó como *free* como se muestra en la Figura 14 ya que esto es lo que simula el movimiento que puede haber en el eje.

Figura 13: Tipos de soportes aplicados



Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

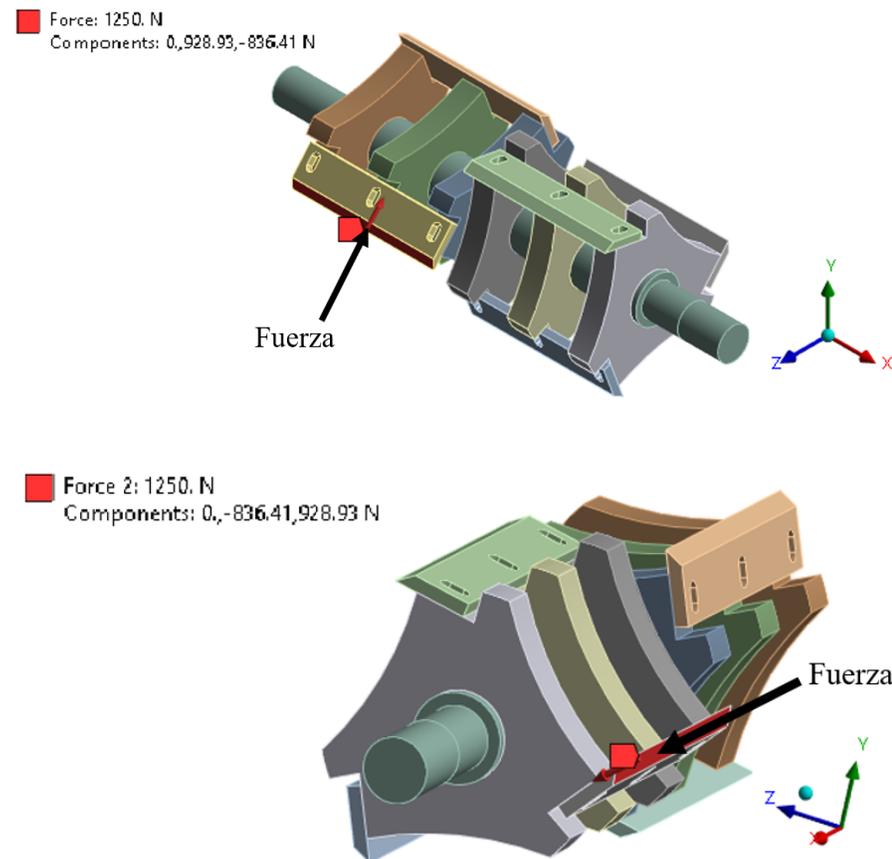
Figura 14: Configuración soporte tipo *Cylindrical Support*

Definition	
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Fixed
Tangential	Free
Suppressed	No

Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

Se aplicaron 2 cargas tipo *force*, de la misma magnitud, pero diferente dirección en toda la superficie de la cuchilla que cortará el material. Estas se colocaron como se muestra en la Figura 15.

Figura 15: Configuración de fuerza en cuchillas móviles



Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

En cuanto a los materiales y sus propiedades. En el eje se pueden encontrar dos materiales. Para los porta cuchillas y el eje se utilizó acero AISI 1045 el cual tiene un módulo de elasticidad de 206 GPa, una resistencia a la fluencia de 530 MPa, una resistencia a la

tensión de 625 MPa y una razón de Poisson de 0.29. En las cuchillas se colocó acero AISI D2 el cual tiene un módulo de elasticidad de 190 GPa, una resistencia a la tensión de 760 MPa, una resistencia a la fluencia de 470 MPa y una razón de Poisson de 0.28.

Con respecto al mallado, se generó el automático por ANSYS y se determinó que tenía una calidad promedio de 0.31 con un máximo de 0.97. Esto se encuentra en el rango de un mallado bueno por lo que se decidió solamente utilizar *body sizing* en todos los elementos. En el caso del eje y las cuchillas se tenía un valor de 17 mm y para los porta cuchillas el valor fue de 16 mm. Teniendo esto en cuenta se obtuvo una calidad de 0.23 con un máximo de 0.98 pero al ser pocos elementos y no se encuentran en las secciones críticas del análisis, se considera que el mallado está en el rango de “excelente”.

Figura 16: Mallado eje cuchillas móviles



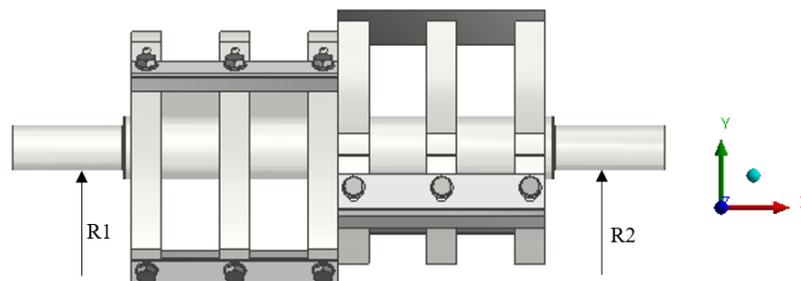
Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

6.2.5. Rodamientos

Utilizando el mismo programa mencionado, después de la simulación, se determinaron las fuerzas de reacción en las áreas donde se colocan los rodamientos para así poder realizar los cálculos para seleccionarlos. Es importante mencionar que para estas reacciones se considera el peso de todos los componentes del eje.

A continuación, se muestra, en la Figura 17, la ubicación de estas fuerzas de reacción.

Figura 17: Ubicación de las fuerzas de reacción en el eje



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.)

Se obtuvo la magnitud de la fuerza, así como los componentes de cada una. Para la primera reacción (R1) se tuvo una magnitud de 1,227.3 N, su componente en el eje x fue 103.7 N, en el eje y se obtuvo un valor de 1,153.1 N y en el eje z el valor fue de 407.41 N. En el caso de la segunda reacción (R2), la magnitud fue de 2,116.7 N, su componente en el eje x fue de -96.46 N, en el eje y fue de 2,043.2 N y en el eje z se tenía un valor de -544.2 N.

Para los rodamientos se utilizó el catálogo SKF para chumaceras y se escogieron dos tipos uno con pestaña redonda y otro con pestaña cuadrada. Se eligieron rodamientos con pestaña debido a la posición en la que estos debían ser colocados en la estructura. Debido a que estos van a estar sometidos a carga dinámica se encontró la vida nominal de cada rodamiento utilizando las fuerzas de reacción presentadas anteriormente.

Para el rodamiento de pestaña redonda se escogió el modelo F4BR 311-SRB-CRE. Este fue escogido debido a que tiene posibilidad de sujeción con 3 o 4 tornillos, es autoalineante y tiene un tipo de sello TriGrad el cual cuenta con un protector de basura externo para proteger el sello y excluye contaminantes más grandes. También tiene un límite de temperatura de 200 °F (93.33 °C) lo cual se considera correcto para la aplicación que se requiere. Este rodamiento tenía una carga dinámica C de 97,300 lbs (432,811.96 N) (SKF, s.f.-a) y se utilizó la siguiente ecuación para encontrar la vida nominal.

$$L = (C/P)^p \quad (9)$$

Donde L es la vida nominal básica, C es la capacidad de carga dinámica, P es la carga dinámica equivalente del rodamiento y p es el exponente de la ecuación.

Se tiene un rodamiento de rodillos esféricos los cuales tienen la capacidad de manejar altas cargas radiales y axiales, debido a esto, el exponente p tiene un valor de 10/3. Con respecto a la carga dinámica equivalente en el primer rodamiento (R1), este estará sometido tanto a cargas radiales como carga axial. En este caso es necesario definir la ecuación a utilizar para obtener la carga equivalente. Para esto es necesario determinar lo siguiente

$$\frac{F_a}{F_r} \leq e \quad (10)$$

Donde F_a es la carga axial, F_r es la carga radial y e es un factor de cálculo dependiendo del rodamiento.

Se determina que la carga radial se aplica tanto en el eje y como en el z por lo que al obtener la magnitud se tiene un valor de 1,222.96 N. En cuanto a la carga axial se tiene un valor de 103.7 N. Respecto al factor e , según el catálogo SKF para el rodamiento escogido se tiene un valor de 0.24.

Al aplicar la ecuación anterior se obtiene lo siguiente

$$\frac{103.7 \text{ N}}{1,222.96 \text{ N}} = 0.08$$

Al ser un valor menor a e (0.24) se utiliza la siguiente ecuación para obtener la carga dinámica equivalente

$$P = F_r + Y_1 F_a \quad (11)$$

Donde P es la carga equivalente, F_r es la carga radial, Y_1 es un factor de cálculo dependiendo del rodamiento y F_a es la carga axial.

En el caso de Y_1 , según el catálogo SKF, para el rodamiento escogido, se tiene un valor de 2.8. Al aplicar la ecuación anterior se tiene una carga dinámica equivalente es

$$P = 1,222.96 N + 2.8(103.7 N)$$

$$P = 1,513.32 N$$

Con este valor definido se calcula la vida nominal del rodamiento de pestaña redonda

$$L = \left(\frac{432,811.96 N}{1,513.32 N} \right)^{10/3}$$

$$L = 1.54 \times 10^8 \text{ ciclos}$$

Utilizando esta vida nominal en ciclos, se determinó la vida en horas utilizando la siguiente ecuación

$$L_h = \frac{10^6}{60 * n} * L \quad (12)$$

Donde L es la vida nominal en ciclos y n es la velocidad de giro en *rpm*

El valor n a utilizar es 667 RPM debido a que estas son las revoluciones que proporciona el motor de la trituradora. Aplicando la ecuación se obtiene lo siguiente

$$L_h = \frac{10^6}{60 * 667 \text{ rpm}} * (1.54 \times 10^8 \text{ ciclos})$$

$$L_h = 3.85 \times 10^9 \text{ horas}$$

Para el segundo rodamiento se realizó el mismo procedimiento. En este caso se tenía un valor de carga radial de 2,114.43 N y carga axial de 96.46 N . Realizando la división presentada en la ecuación [10](#) se obtuvo un valor de 0.05 por lo cual también se tiene un valor menor a e . Debido a esto se utiliza la ecuación [11](#)

Se obtuvo lo siguiente

$$P = 2,114.43 N + 2.8(96.46 N)$$

$$P = 2,384.52 N$$

Con esta carga al obtener la vida nominal se tuvo el siguiente valor

$$L = \left(\frac{432,811.96 N}{2,384.52 N} \right)^{10/3}$$

$$L = 3.39 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

También se obtuvo la vida en horas para este rodamiento utilizando el mismo procedimiento mencionado anteriormente

$$L_h = \frac{10^6}{60 * 667 \text{ rpm}} * (3.39 \times 10^7 \text{ ciclos})$$

$$L_h = 8.46 \times 10^8 \text{ horas}$$

Este proceso también se siguió para rodamientos con pestaña cuadrada, se escogió el modelo F4BE 311-SRB-CRE el cual se sujeta con 4 tornillos, también es autoalineante y tiene un sello de tipo TriGrad. Este tiene la misma carga dinámica por lo que los resultados son iguales a los de la pestaña redonda.

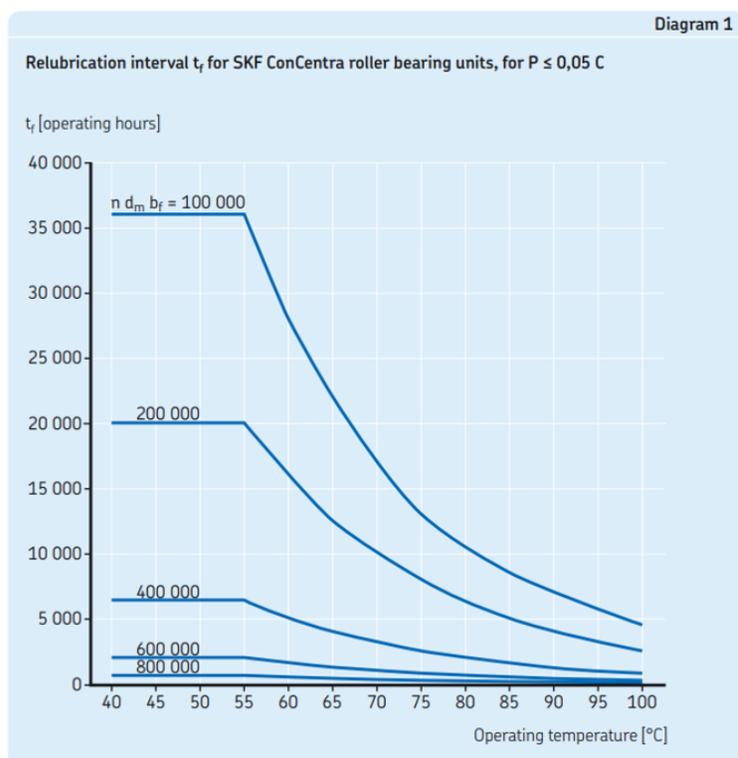
Es importante establecer la disposición de los rodamientos. En este caso se determina que el rodamiento colocado en R1 se define como fijo ya que este absorbe fuerzas radiales y axiales y en este es donde se da una carga axial mayor. En el caso del rodamiento posicionado en R2, este se define como libre ya que este absorbe las cargas radiales y permite el desplazamiento axial. En este caso por ser un rodamiento de rodillos esféricos el desplazamiento se da en el propio rodamiento. (EUROPE, [s.f.](#))

6.2.6. Lubricación de rodamientos

Se determinó cuál sería el mejor lubricante para los rodamientos elegidos. Para esto se hizo uso del catálogo SKF titulado *SKF ConCentra roller bearing units*. En este se establece que es necesario definir la temperatura de operación, RPM y el diámetro medio del rodamiento para poder determinar el tiempo en horas entre cada lubricación.

En el catálogo se establecen 3 diagramas que se puede utilizar para encontrar este tiempo. Para determinar cuál se debe usar se tienen ciertas ecuaciones. En este caso se definió que era necesario utilizar el diagrama 1 presentado en la Figura [18](#). Debido a que la carga P aplicada a los rodamientos era menor a 0.05 veces la carga dinámica C.

Figura 18: Intervalo de relubricación



Fuente: (SKF, [s.f.-b](#))

Se observa que es necesario determinar la siguiente multiplicación

$$n * d_m * b_f \quad (13)$$

Donde n son las RPM, d_m es el diámetro medio y b_f es el factor del rodamiento.

Se define el valor del diámetro medio de la siguiente manera

$$d_m = \frac{bore + OD}{2} \quad (14)$$

Donde $bore$ es el diámetro interior del rodamiento y OD es el diámetro exterior.

Obteniendo valores del catálogo

$$d_m = \frac{93.6625\ mm + 180\ mm}{2}$$

$$d_m = 137\ mm$$

Utilizando el catálogo se define que un valor recomendando de $n*d_m$ para este rodamiento es de 150,000.

En cuanto al factor del rodamiento b_f es necesario establecer si la división entre la carga axial y radial es menor al límite del rodamiento. En este caso se realizaron las divisiones para ambos rodamientos y se obtuvo lo siguiente para cada rodamiento.

$$\frac{F_a}{F_r} = 0.05$$
$$\frac{F_a}{F_r} = 0.08$$

Debido a que ambos valores son menores al límite del rodamiento, según el catálogo SKF para lubricantes de chumaceras ConCentra se utiliza un factor de 2. Teniendo estos valores se definió que la multiplicación de los factores tenía un resultado de 300,000 y con una temperatura de 70° se estableció que el intervalo entre lubricaciones t_f era el siguiente

$$t_f = 7,500 \text{ horas}$$

Según el catálogo, si el intervalo entre lubricaciones es mayor a los 6 meses se recomienda el método de renovación de grasa. Este consiste que cuando se llega el momento en que es necesario relubricar, se bombea la grasa hasta que se sustituye la grasa vieja por la nueva.

Para definir la grasa a utilizar para la relubricación, de igual forma se utilizan los catálogos de los rodamientos. Se establece que estos, de fábrica tienen la grasa SKF LGEP2 la cual se utiliza para rodamientos que soportan cargas elevadas y temperaturas medias.

Para la situación en la que trabajarán estos rodamientos se determinaron los siguientes parámetros. En el caso de la temperatura, se trabaja entre 50° y 100 °C por lo cual se define como media. Para el rodamiento escogido también se trabaja con una velocidad media ya que la multiplicación entre n y d_m es menor a 210,000. En el caso de la carga, la división entre la carga dinámica C y la carga P es mayor a 15 por lo que se define la carga como baja.

Teniendo todo esto en consideración se estableció que el lubricante que se utilizará para estos rodamientos es SKF LGMT3 la cual es una grasa de uso general en la industria y tiene excelentes propiedades antioxidantes y alta estabilidad a la oxidación dentro del margen de temperatura recomendado.

6.2.7. Tornillos de sujeción de cuchillas móviles

Se realizaron cálculos de esfuerzo en los tornillos de sujeción de las cuchillas. Como ya se mencionó estos son tornillos grado 8.8, M22 x 2.5 x 90 y se colocan 3 en cada cuchilla. Se establece que estos tornillos tienen una precarga y por lo tanto se debe obtener el esfuerzo provocado por esta. También, debido a la dirección de la fuerza de corte, estos tornillos se encuentran en cortante por lo que es necesario el cálculo de distintos esfuerzos para este caso.

En cuanto a la precarga, debido a que las cuchillas son un elemento que se debe remover cada cierto tiempo se considera que la conexión de los pernos es no permanente por lo cual

se utiliza la siguiente ecuación

$$F_i = 0.75F_p \quad (15)$$

Donde F_p es la carga de prueba la cual se obtiene con la siguiente ecuación

$$F_p = A_t * S_p \quad (16)$$

Donde S_p es la resistencia de prueba del tornillo y A_t es el área de esfuerzo de tensión del tornillo.

Utilizando el Cuadro 4 se obtuvo el área de esfuerzo de tensión A_t . Para esto es necesario hacer una interpolación debido a que el diámetro nominal del tornillo es de 22 mm. Considerando que se tiene una rosca fina se obtuvo un valor A_t de 328 mm^2 . Con el Cuadro 5 se determinó que la resistencia de prueba S_p de un tornillo grado 8.8 es de 600 MPa.

Cuadro 4: Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino

Diámetro mayor nominal d, mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm^2	Área del diámetro menor A_r , mm^2	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm^2	Área del diámetro menor A_r , mm^2
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

Cuadro 5: Clases métricas de propiedad de pernos, tornillos y birlos de acero

Clase de propiedad	Intervalos de tamaños, inclusivo	Resistencia de prueba mínima MPa	Resistencia mínima a la tensión MPa	Resistencia mínima a la fluencia MPa	Material
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T Y R
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R
10.9	M5-M36	830	1040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Acero aleado, T y R

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

$$F_p = 600 \text{ MPa} * 328 \text{ mm}^2$$

$$F_p = 196,800 \text{ N}$$

Utilizando los datos anteriores se obtiene una precarga de

$$F_i = 0.75 * 196,800 \text{ N}$$

$$F_i = 147,600 \text{ N}$$

Con esta precarga se puede obtener el torque necesario que se debe aplicar a los tornillos. Para esto es necesario utilizar la ecuación

$$T = K F_i d \tag{17}$$

Donde K es el coeficiente de torque, F_i es la precarga y d es el diámetro del tornillo

Para obtener el coeficiente de torque K es necesario revisar la tabla 8-15 del libro de Shigley presentada en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Factores del par de torsión K para varios tipos de acabado de pernos

Condición del perno	K
Sin recubrimiento, acabado negro	0.30
Galvanizado	0.20
Lubricado	0.18
Con recubrimiento de cadmio	0.16
Con Anti-Seize Bowman	0.12
Con tuercas Bowman - Grip	0.09

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

En este caso se establece que los tornillos son galvanizados por lo cual se utiliza un factor K de 0.20.

Aplicando la ecuación se obtiene un torque de

$$T = 0.20 * 147,600 N * 22 mm$$

$$T = 649,440 Nmm$$

$$T = 649.44 Nm$$

Habiendo calculado lo anterior es posible obtener el esfuerzo ocasionado por la precarga de los tornillos. Para esto se utiliza la siguiente ecuación.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} \quad (18)$$

Donde F_i es la precarga y A_t es el área de esfuerzo de tensión

Obteniendo σ_i

$$\sigma_i = \frac{147,600 N}{328 mm^2}$$

$$\sigma_i = 450 MPa$$

Respecto a la fuerza que genera corte en los tornillos, primero se debe calcular el esfuerzo por flexión. Debido a que este es muy bajo, no se considera en el diseño.

Se procede a calcular el esfuerzo de corte puro en el tornillo. Para esto se utilizó la siguiente ecuación.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (19)$$

En este caso el área es la sección transversal del tornillo utilizando el diámetro menor. Esta se obtiene del Cuadro 4. Con este cuadro se realiza una interpolación para obtener el valor A_r de un tornillo de 22 mm. La fuerza es la que se le aplica a la cuchilla. Debido a que son 3 tornillos esta se tiene que dividir en 3 para encontrar el esfuerzo en cada uno.

$$F = \frac{1250 N}{3} = 416.67 N$$

$$A_r = 274.5 mm^2$$

Aplicando la ecuación

$$\tau = \frac{416.67 N}{274.5 mm^2}$$

$$\tau = 1.52 MPa$$

El siguiente esfuerzo que se debe calcular es la tensión pura en el elemento, en este caso se tiene la cuchilla y el seguro. En el caso de la cuchilla se utiliza la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (20)$$

En esta el área ya no es la del tornillo si no que la sección transversal donde se está aplicando la carga, en este caso se obtuvo de la siguiente manera

$$A = [l - (\text{numerodetornillos} * d_{\text{tornillos}})]t \quad (21)$$

Donde l es el largo de la cuchilla, t es el espesor de la cuchilla y d_{tornillo} es el diámetro del tornillo.

$$A = [410 \text{ mm} - (3 * 22 \text{ mm})]20 \text{ mm}$$

$$A = 6,880 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación

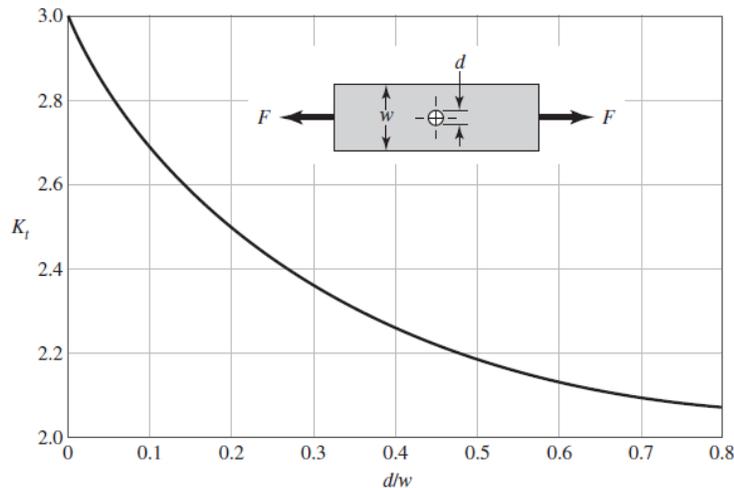
$$\sigma_{\text{tensionpura}} = \frac{1250 \text{ N}}{6,880 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{\text{tensionpura}} = 0.18 \text{ MPa}$$

Es importante mencionar que se debe incluir la concentración de esfuerzos en el elemento sujetado debido a que este es de material dúctil y la carga aplicada es dinámica.

Debido a que se tiene un esfuerzo normal es necesario el factor de concentración K_t . Para encontrarlo se utiliza la Figura 19. Con esta se obtuvo un valor de 2.5. Aplicando esta consideración se tiene el siguiente esfuerzo máximo

Figura 19: Factor de concentración tensión o compresión simple con agujero transversal



Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

$$\sigma_{\text{max}} = K_t * \sigma_{\text{tensionpura}} \quad (22)$$

$$\sigma_{\text{max}} = 2.5 * .18 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 0.45 \text{ Mpa}$$

En cuanto al seguro se siguió el mismo procedimiento mencionado anteriormente. En este caso se aplica la misma ecuación de área y se obtiene lo siguiente.

$$A = [410 \text{ mm} - (3 * 22 \text{ mm})]5 \text{ mm}$$

$$A = 1,720 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación de esfuerzo para el seguro se obtiene

$$\sigma_{tensionpura} = \frac{1250 \text{ N}}{1,720 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{tensionpura} = 0.73 \text{ MPa}$$

En el seguro también es importante aplicar la concentración de esfuerzos. Utilizando la Figura 19 se tiene un valor de K_t de 2.36 por lo cual el esfuerzo máximo en el seguro es de

$$\sigma_{max} = K_t * \sigma_{tensionpura} \quad (23)$$

$$\sigma_{max} = 2.36 * 0.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 1.72 \text{ Mpa}$$

El último esfuerzo que se calculó para los tornillos fue el de aplastamiento para el cual es necesario el uso de la siguiente ecuación de esfuerzo

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (24)$$

La diferencia con el anterior es el área ya que en este caso debe ser el área de la sección comprimida, tanto en el tornillo como en la placa. En este caso se tienen tanto para las cuchillas como el seguro. El cálculo de esta, en el caso de la cuchilla se realizó de la siguiente manera.

$$A = d_{tornillo} * t_{cuchilla} \quad (25)$$

$$A = (22 \text{ mm}) * (20 \text{ mm})$$

$$A = 440 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación se obtuvo el siguiente valor

$$\sigma_{aplastamiento} = \frac{1250 \text{ N}}{440 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{aplastamiento} = 2.84 \text{ MPa}$$

Para el seguro se siguió el mismo procedimiento y el área obtenida fue la siguiente

$$A = d_{tornillo} * t_{seguro} \quad (26)$$

$$A = (22 \text{ mm}) * (5 \text{ mm})$$

$$A = 110 \text{ mm}^2$$

Aplicando nuevamente la ecuación se tuvo el siguiente resultado para el esfuerzo de aplastamiento en el seguro

$$\sigma_{aplastamiento} = \frac{1250 \text{ N}}{110 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = 11.36 \text{ MPa}$$

En cuanto al desgarre, para este no se realizó un cálculo de esfuerzo ya que se sabe que el perno debe estar a 1.5 veces el diámetro del tornillo, del borde. En este caso se tiene un diámetro de 22 mm por lo cual la distancia mínima que debería tener es de 33 mm. Esto se tomó en cuenta para el diseño y se tiene una distancia de 44 mm desde el borde por lo que de esta manera se evita tener desgarre.

6.2.8. Factor de seguridad a la fatiga y fluencia cuchillas móviles

Se obtuvo el factor de seguridad a la fatiga de los tornillos en las cuchillas móviles utilizando la teoría de falla de Goodman modificado debido a que se tiene una carga dinámica. Como se mencionó anteriormente, se tiene un esfuerzo por la precarga que provoca tensión en el tornillo y un esfuerzo de corte debido a la fuerza aplicada. Teniendo esto en consideración, se tiene un caso de esfuerzos normales y cortantes combinados por lo cual se debe utilizar la siguiente ecuación

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (27)$$

Donde σ'_a es el esfuerzo de Von Mises alternante, σ'_m es el esfuerzo de Von Mises medio, S_e es el límite de resistencia a la fatiga y S_{ut} es la resistencia última a la tensión.

Para poder obtener el esfuerzo Von Mises medio y alternante se deben utilizar las siguientes ecuaciones

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{max} + \sigma'_{min}}{2} \quad (28)$$

$$\sigma'_a = \frac{\sigma'_{max} - \sigma'_{min}}{2} \quad (29)$$

Para obtener el esfuerzo Von mises máximo se determina que este se compone del esfuerzo de torque provocado por la fuerza de corte y el esfuerzo generado por la precarga por lo cual se realiza el siguiente procedimiento

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (30)$$

Donde σ_x es el esfuerzo normal en x , σ_y el esfuerzo normal en y y τ es el esfuerzo de corte.

Se determina que el esfuerzo generado por la precarga solamente actúa en una dirección, en este caso en el eje y por lo cual al aplicar la ecuación anterior se obtiene lo siguiente

$$\begin{aligned} \sigma' &= [0^2 - (0 * 450 \text{ MPa}) + 450^2 \text{ MPa} + 3(1.52^2 \text{ MPa})]^{1/2} \\ \sigma' &= 450.008 \text{ MPa} \end{aligned}$$

En el caso del esfuerzo mínimo, este se da cuando no se está aplicando la fuerza y por lo tanto no se da el esfuerzo de corte. Esto quiere decir que solamente se tiene el esfuerzo generado por la precarga. Debido a esto el esfuerzo mínimo tiene un valor de 450 MPa .

Al determinar el esfuerzo medio y alternante con las ecuaciones mencionadas anteriormente se obtiene lo siguiente

$$\sigma'_m = \frac{450.008 \text{ MPa} + 450 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma'_m = 450.004 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_a = \frac{450.008 \text{ MPa} - 450 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma'_a = 0.0038 \text{ MPa}$$

Para encontrar el límite de resistencia a la fatiga se utiliza la ecuación de Marin (Budynas & Nisbett, 2012)

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S'_e \quad (31)$$

Donde k_a es el factor por condición superficial, k_b es el factor por tamaño, k_c el factor por carga, k_d factor por temperatura, k_e factor de confiabilidad y S'_e es la resistencia a la fatiga del material.

Se inició encontrando la resistencia a la fatiga del material que en este caso es acero. Para esto se utiliza la siguiente ecuación (Budynas & Nisbett, 2012)

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad (32)$$

Donde S_{ut} es la resistencia última a la tensión del tornillo

Esta resistencia se encuentra en la tabla 8-11 del libro de Shigley presentada en el Cuadro 5.

Como se observa en el Cuadro 5, para tornillos de grado 8.8, la resistencia última a la tensión es de 830 MPa por lo que la resistencia a la fatiga del material es

$$S'_e = 0.5 * 830 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 415 \text{ MPa}$$

Luego se definió el primer factor k_a utilizando la tabla 6-2 del libro de Shigley presentada en el Cuadro 7 y la siguiente ecuación

Cuadro 7: Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	-0.995

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2012)

$$k_a = a.S_{ut}^b \quad (33)$$

El factor a se eligió como 4.51 y el factor b como -0.265 para así al final tener un valor de k_a de

$$k_a = 0.76$$

Para el factor de tamaño k_b se utilizó la ecuación

$$k_b = 0.879d^{-0.107} \quad (34)$$

En esta se ingresó el diámetro de 22 mm en pulgadas por lo que al final se obtuvo que este factor tenía un valor de

$$k_b = 0.879 * 0.86^{-0.107}$$

$$k_b = 0.89$$

En el caso del factor de tipo de carga k_c se tiene

Cuadro 8: Factor por carga

	Flexión	Axial	Torsión
k_c	1	0.85	0.59

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2012)

En este caso se establece que el factor por carga k_c es de 1.

Para el factor de temperatura k_d se utiliza la tabla 6-4 del libro de Shigley presentada en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero

Temperatura °C	S_T/S_{RT}	Temperatura °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2012)

Según la tabla se elige un factor de uno ya que este sistema trabaja a temperatura ambiente.

Para el último factor de confiabilidad k_e se utiliza la tabla 6-5 del libro de Shigley

Cuadro 10: Factores de confiabilidad k_e

Confiabilidad %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente:(Budynas & Nisbett, 2012)

Se elige una confiabilidad de 99.99 por lo que el factor k_e tiene un valor de 0.702.

Teniendo los factores completos y aplicándolos a la ecuación de Marín, se obtuvo que la resistencia a la fatiga era de

$$S_e = 0.76 * 0.89 * 1 * 1 * 0.702 * 415 \text{ MPa}$$

$$S_e = 197.70 \text{ MPa}$$

Después de definir este valor, utilizando el Cuadro 5 se determinó que el valor S_{ut} para un tornillo grado 8.8 de 22 mm es de 830 MPa

Teniendo estos valores se calculó el factor de seguridad a la fatiga.

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \quad (35)$$

$$n = \frac{1}{\frac{0.0038 \text{ MPa}}{197.70 \text{ MPa}} + \frac{450.004 \text{ MPa}}{830 \text{ MPa}}}$$

$$n = 1.84$$

Respecto al factor de seguridad a la fluencia se utiliza la siguiente ecuación

$$n_p = \frac{S_p}{\sigma'_m + \sigma'_a} \quad (36)$$

Donde S_p es la resistencia de prueba del tornillo, σ'_m es el esfuerzo medio y σ'_a es el esfuerzo alternante.

Para este tornillo se tiene una resistencia de prueba S_p de 600 MPa por lo que el factor de seguridad de fluencia es

$$n_p = \frac{600 \text{ MPa}}{450.004 \text{ MPa} + 0.0038 \text{ MPa}}$$

$$n_p = 1.33$$

6.2.9. Tornillos de sujeción de cuchillas fijas

Se calcularon los esfuerzos para los tornillos utilizados en las cuchillas fijas los cuales son M22 x 2.5 x 50 grado 8.8. Para esto se consideró que estos también son tornillos sometidos a cortante

Se establece que estos también tienen precarga. El esfuerzo generado por esta tiene el mismo valor que en el caso anterior debido a el tipo de tornillo y al diámetro de este. Respecto al corte, debido a que es el mismo caso anterior se deben calcular los mismos esfuerzos y seguir el mismo procedimiento.

Se inicia calculando el esfuerzo de corte puro en el tornillo utilizando la ecuación [19](#). En este caso el área a utilizar es la misma debido a que se utiliza un tornillo de 22 mm de diámetro. Respecto a la fuerza, en estas cuchillas se tienen 4 tornillos por lo cual ahora la fuerza debe ser dividida por 4 para tener el esfuerzo en cada uno.

$$F = \frac{1250 \text{ N}}{4} = 312.5 \text{ N}$$

$$A_r = 274.5 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación [19](#)

$$\tau = \frac{312.5 N}{264.5 mm^2}$$

$$\tau = 1.14 MPa$$

Se procedió a realizar el cálculo de la tensión pura en el elemento, en este caso se tiene la cuchilla y la lámina de la estructura. Se utilizan las ecuaciones 20 y 21 para obtener el área.

En el caso de la cuchilla se utiliza un espesor de 20 mm para obtener el área.

$$A = [410 mm - (4 * 22 mm)]20 mm$$

$$A = 6,440 mm^2$$

Aplicando la ecuación se obtuvo lo siguiente

$$\sigma_{tensionpura} = \frac{1250 N}{6,440 mm^2}$$

$$\sigma_{tensionpura} = 0.19 MPa$$

Se utiliza la Figura 19 para obtener el factor de concentración de esfuerzos y se tiene nuevamente un valor de 2.5 por lo que al aplicar la ecuación 22 se tiene un valor de

$$\sigma_{max} = 2.5 * 0.19 MPa$$

$$\sigma_{max} = 0.49 MPa$$

En cuanto a la lámina se siguió el mismo procedimiento

$$A = [410 - (4 * 22 mm)]9.52 mm$$

$$A = 3,065 mm^2$$

Aplicando la ecuación de esfuerzo se obtiene

$$\sigma_{tensionpura} = \frac{1250 N}{3,065 mm^2}$$

$$\sigma_{tensionpura} = 0.41 MPa$$

Utilizando la Figura 19 se obtuvo un valor de concentración de esfuerzos de 2.55 por lo que se obtuvo un valor de esfuerzo de

$$\sigma_{max} = 2.55 * 0.41 MPa$$

$$\sigma_{max} = 1.04 MPa$$

Por último también se calculó el aplastamiento para el cual se utiliza la ecuación [24](#). Para esta primero se obtuvo el valor del área en el caso de la cuchilla

$$A = 22 \text{ mm} * 20 \text{ mm}$$
$$A = 440 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación se obtuvo lo siguiente

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{1250 \text{ N}}{440 \text{ mm}^2}$$
$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = 2.84 \text{ MPa}$$

En el caso de la lámina se siguió el mismo procedimiento

$$A = 22 \text{ mm} * 9.52 \text{ mm}$$
$$A = 209.44 \text{ mm}^2$$

Aplicando la ecuación de esfuerzo para aplastamiento se obtuvo

$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = \frac{1250 \text{ N}}{209.44 \text{ mm}^2}$$
$$\sigma_{\text{aplastamiento}} = 5.97 \text{ MPa}$$

Para estos tornillos se aplica la misma condición respecto al desgarre. En este caso se tiene una distancia de 48 mm lo cual es mayor a 33 mm y por lo tanto se evita el desgarre en estos elementos.

6.2.10. Factor de seguridad a la fatiga y falla por fluencia cuchillas fijas

Para el factor de seguridad a la fatiga de los tornillos de sujeción de las cuchillas fijas se decide utilizar también la teoría de falla de Goodman modificado para lo cual se utiliza la ecuación [27](#). Como ya se mencionó, en este caso también se tiene el esfuerzo por precarga y el esfuerzo de corte por lo cual se debe obtener el esfuerzo Von Mises con la ecuación [30](#).

Aplicando la ecuación para obtener el esfuerzo máximo se obtiene lo siguiente

$$\sigma' = [0^2 - (0 * 450 \text{ MPa}) + 450^2 \text{ MPa} + 3(1.14^2 \text{ MPa})]^{1/2}$$
$$\sigma' = 450.004 \text{ MPa}$$

En cuanto al esfuerzo mínimo, este de igual forma se da cuando no se está aplicando la fuerza y por lo tanto solamente se tiene el valor de la precarga. En este caso también se tiene un valor de 450 MPa .

Se utilizan las ecuaciones [28](#) y [29](#) para determinar el esfuerzo medio y alternante.

$$\sigma'_m = \frac{450.004 \text{ MPa} + 450 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma'_m = 450.002 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_a = \frac{450.004 \text{ MPa} - 450 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma'_a = 0.0022 \text{ MPa}$$

En este caso también es necesario obtener el límite de resistencia a la fatiga para lo cual se utiliza la ecuación de Marin presentada anteriormente. Se define que el valor de los distintos factores para este caso también son los mismos por lo cual se tiene un S_e de 197.70 MPa .

En cuanto al valor de la resistencia última a la tensión S_{ut} debido a que es el mismo tornillo, según el Cuadro 5 se tiene un valor de 830 MPa

Aplicando la ecuación del factor de seguridad, para estos tornillos se obtuvo lo siguiente

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \quad (37)$$

$$n = \frac{1}{\frac{0.0022 \text{ MPa}}{197.70 \text{ MPa}} + \frac{450.002 \text{ MPa}}{830 \text{ MPa}}}$$

$$n = 1.84$$

En cuanto a la falla por fluencia se utiliza la ecuación 36 y por lo tanto se tiene lo siguiente

$$n_p = \frac{600 \text{ MPa}}{450.002 \text{ MPa} + 0.0022 \text{ MPa}}$$

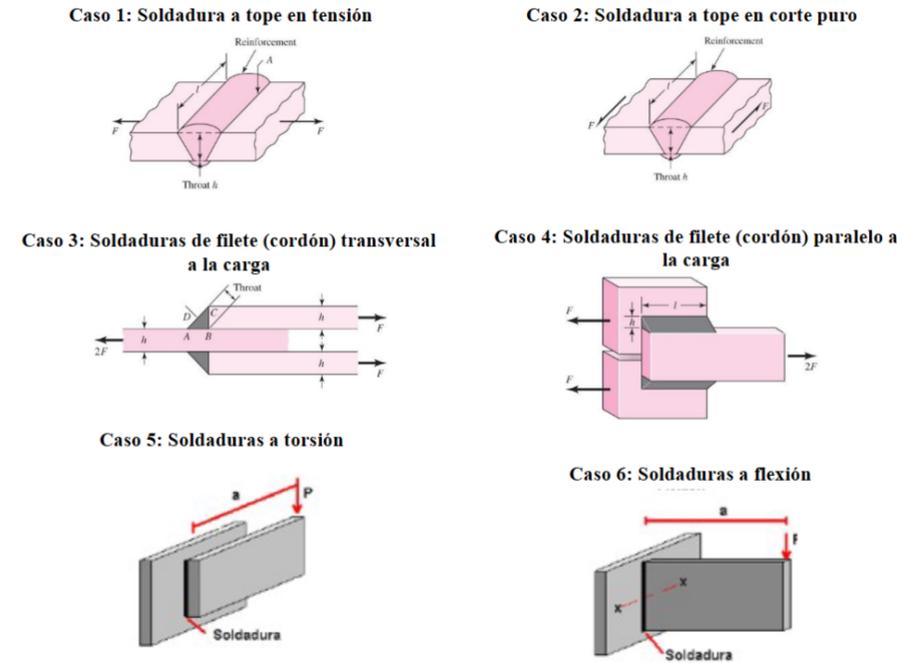
$$n_p = 1.33$$

6.2.11. Soldadura

Con respecto a la soldadura, los seis porta cuchillas deben estar soldados con el eje principal. Es importante analizar los esfuerzos que la fuerza de corte puede provocar en esta unión de elementos ya que si una de estas falla puede tener graves consecuencias en el sistema de trituración.

Para la soldadura se tienen seis casos principales presentados en la Figura 20. En este caso, debido a la dirección de la fuerza de corte, se tiene el caso 4 de soldadura de filete paralela a la carga.

Figura 20: Casos de soldadura



Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

Para este caso se debe calcular el esfuerzo de corte para lo cual se utiliza la siguiente ecuación

$$\tau = \frac{F}{0.707hl} \quad (38)$$

Donde τ es el esfuerzo de corte, F es la fuerza aplicada, h es la garganta y l es el largo del cordón de soldadura.

La fuerza utilizada en este caso es la fuerza de corte de 1250 N dividido 3 ya que por cada cuchilla son 3 porta cuchillas por lo cual la fuerza es de 466.67 N . Se considera que en el otro grupo de portacuchillas, de igual forma hay una cuchilla que está cortando al mismo tiempo por lo que en estos también se está dando la misma fuerza. Para la garganta se tiene un cordón de $3/16 \text{ in}$ (4.7625 mm) y en el caso del largo del cordón, como se está soldando el eje con los porta cuchillas, el largo es el perímetro del eje. Utilizando el diámetro de 125 mm se obtuvo un valor l de 392.70 mm .

Utilizando los datos mencionados anteriormente y la ecuación 38 se obtuvo lo siguiente

$$\tau = \frac{466.67 \text{ N}}{(0.707)(4.7625 \text{ mm})(392.70 \text{ mm})}$$

$$\tau = 0.315 \text{ MPa}$$

Teniendo este esfuerzo se utilizan dos métodos para comprobar que no habrá una falla en la soldadura. Según el código AISC, presentado en el Cuadro 11, para el esfuerzo permisible

de una carga de corte en una soldadura de filete se utiliza la ecuación [39](#)

Cuadro 11: Esfuerzos permisibles, Código AISC

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	n
Tensión	A tope	$0.60S_y$	1.67
Aplastamiento	A tope	$0.90S_y$	1.11
Flexión	A tope	$0.60 - 0.66S_y$	1.52 - 1.67
Compresión simple	A tope	$0.60S_y$	1.67
Cortante	A tope o de filete	$0.30S_{ut}$	

El esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0.40S_y$ del metal base

Fuente: (Budynas & Nisbett, [2012](#))

$$\tau_{perm} = 0.30S_{ut} \quad (39)$$

Donde τ_{perm} es el esfuerzo de corte permisible y S_{ut} es la resistencia a la tensión del material de aporte.

Para obtener la resistencia a la tensión se utiliza la tabla 9-3 del libro de Shigley la cual se presenta en el Cuadro [12](#).

Cuadro 12: Propiedades mínimas de electrodos

Número de electrodo AWS	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17 - 25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14 - 17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13 - 16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

Fuente: (Budynas & Nisbett, [2012](#))

Generalmente se escoge un electrodo que tenga propiedades más elevadas que el material que se está soldando. En este caso se tiene un acero AISI 1045 el cual tiene una resistencia a la fluencia de $530 MPa$ y una resistencia a la tensión de $625 MPa$. Debido a esto se elige un electrodo E100xx.

Con la resistencia a la tensión S_{ut} de $689 MPa$ se obtuvo un esfuerzo de corte permisible de

$$\tau_{perm} = 0.30 * 689 MPa$$

$$\tau_{perm} = 206.70 MPa$$

Teniendo en cuenta la nota presentada al final del Cuadro 11 se calculó también el esfuerzo permisible para el metal base utilizando la siguiente ecuación

$$\tau_{perm} = 0.40S_y \quad (40)$$

Como ya se mencionó se está trabajando con acero AISI 1045 el cual tiene un resistencia a la fluencia S_y de $530 MPa$ por lo cual el esfuerzo permisible en este caso es

$$\tau_{perm} = 0.40 * 530 MPa$$

$$\tau_{perm} = 212 MPa$$

El segundo método utilizado para determinar que no fallaría ni la soldadura ni la pieza que se está soldando fue encontrando el factor de seguridad al corte para ambos utilizando la siguiente ecuación

$$n = \frac{S_{Sy}}{\tau} \quad (41)$$

Donde n es el factor de seguridad S_{Sy} es la resistencia a la fluencia al corte del electrodo y τ es el esfuerzo de corte en la soldadura

Para calcular esta se sabe que es la mitad de la resistencia a la fluencia S_y . Utilizando el Cuadro 12 se tiene un valor de $600 MPa$. Calculando S_{Sy} se obtuvo lo siguiente

$$S_{Sy} = 0.5(600 MPa)$$

$$S_{Sy} = 300 MPa$$

Con este dato se calcula el factor de seguridad de la soldadura

$$n = \frac{300 MPa}{0.315 MPa}$$

$$n = 952$$

Para el factor de seguridad de la pieza que se está soldando es necesario obtener el área donde el cordón hace contacto con la pieza y calcular el esfuerzo cortante.

Para el área de contacto, debido a que se está soldando un eje, se asume que es un anillo por lo cual se tiene un radio exterior e interior. La ecuación de área utilizada es la siguiente

$$A = \pi(R^2 - r^2) \quad (42)$$

Donde A es el área de contacto, R^2 es el radio exterior y r^2 es el radio interior.

En este caso se tiene un radio exterior de 67.2625 mm y un radio interior de 62.5 mm por lo cual el área de contacto es la siguiente

$$A = \pi(67.2625^2\text{ mm} - 62.5^2\text{ mm})$$

$$A = 1,941.49\text{ mm}^2$$

Utilizando esta área y la fuerza de corte de 466.67 N se calculo el esfuerzo de corte con la siguiente ecuación

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (43)$$

Donde τ es el esfuerzo de corte, F es la fuerza aplicada y A es el área de contacto entre la soldadura y la pieza que se está soldando.

$$\tau = \frac{466.67\text{ N}}{1941.49\text{ mm}^2}$$

$$\tau = 0.215\text{ MPa}$$

Para el factor de seguridad del metal base, de igual forma es necesaria la resistencia a la fluencia al corte (S_{Sy}) la cual se calcula de la misma manera mencionada anteriormente pero utilizando la resistencia a la fluencia a la tensión del material. En este caso se tiene un valor de 530 MPa por lo tanto se tiene un valor (S_{Sy}) de

$$S_{Sy} = 0.5 * 530\text{ MPa}$$

$$S_{Sy} = 265\text{ MPa}$$

Teniendo estos valores se utiliza la ecuación [41](#) por lo tanto se tiene un factor de seguridad de

$$n = \frac{265\text{ MPa}}{0.215\text{ MPa}}$$

$$n = 1,235$$

En estas piezas se aplica una carga dinámica por lo cual es importante realizar un análisis de fatiga. Para ser más conservadores se utiliza la teoría de Goodman Modificado la cual establece que para el factor de seguridad se tiene lo siguiente

$$\frac{\tau_a}{S_{se}} + \frac{\tau_m}{S_{su}} = \frac{1}{n} \quad (44)$$

Donde τ_a es el esfuerzo de corte alternante, τ_m es el esfuerzo de corte medio, S_{se} y S_{su} son las resistencias al cortante.

Para encontrar el esfuerzo medio y alternante es necesario el uso de las siguientes ecuaciones

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad (45)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad (46)$$

A estos esfuerzo se debe aplicar la concentración de esfuerzos para lo cual se utiliza la tabla 9-5 del libro de Shigley presentada en el cuadro

Cuadro 13: Factores de concentración del esfuerzo, K_{fs}

Tipo de soldadura	K_{fs}
A tope reforzada	1.2
De filete transversal, en la punta	1.5
De filetes paralelos, en el extremo	2.7
A tope en T, con esquinas agudas	2.0

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2012)

En este caso se tiene filete paralelo por lo cual es un factor de 2.7. El esfuerzo cortante máximo es el siguiente

$$\tau_{max} = 2.7 * 0.315 MPa$$

$$\tau_{max} = 0.85 MPa$$

Teniendo este valor se calcula el esfuerzo medio y alternante

$$\tau_m = \frac{0.85 MPa + 0 MPa}{2}$$

$$\tau_m = 0.43 MPa$$

$$\tau_a = \frac{0.85 MPa - 0 MPa}{2}$$

$$\tau_a = 0.43 MPa$$

Como ya se mencionó se utiliza la teoría de Goodman modificado por lo cual se debe encontrar la resistencia al cortante S_{Se} y S_{Su} del material. Para cada una de estas se tenía un estimado el cual se presenta a continuación

$$S_{se} = 0.577 * S_e \quad (47)$$

Donde S_e es el límite de resistencia a la fatiga

$$S_{su} = 0.67 * S_{ut} \quad (48)$$

Donde S_{ut} es el límite de resistencia última a la tensión

En el caso de la resistencia al corte S_{Su} es necesaria la resistencia última a la tensión S_{ut} del material de aporte la cual es de $689 MPa$ por lo cual se tiene lo siguiente

$$S_{Su} = 0.67 * 689 MPa$$

$$S_{Su} = 461.63 MPa$$

En el caso de S_{Se} se utiliza la ecuación de Marin [31](#)

Para esta se calcula la resistencia la fatiga del material S'_e

$$S'_e = 0.5 * 689 MPa$$

$$S'_e = 344.50 MPa$$

En cuanto a los factores para esta ecuación, para k_a se tiene un valor de 0.82. Para k_b se tiene un factor de 0.71. En k_c un valor de 1. k_d tiene un valor de 1 y k_e un factor 0.70.

Con estos valores se tiene un S_{Se} de

$$S_e = 0.82 * 0.71 * 1 * 1 * 0.70 * 344.50 MPa$$

$$S_e = 136.56$$

$$S_{Se} = 0.577 * 136.56$$

$$S_{Se} = 78.80 MPa$$

Con los valores anteriores se calculó el factor de seguridad a la fatiga del material de aporte

$$n_f = \frac{1}{\frac{0.43 MPa}{78.80 MPa} + \frac{0.43 MPa}{461.63}}$$

$$n_f = 158$$

También se calculó el factor de seguridad a la fluencia para el cuál se hizo uso de la siguiente ecuación

$$n_p = \frac{S_y}{\tau_m + \tau_a} \tag{49}$$

$$n_p = \frac{600 MPa}{0.43 MPa + 0.43 MPa}$$

$$n_p = 705$$

Es importante mencionar que se decidió realizar el mismo análisis de soldadura pero considerando un electrodo E60xx. Esto se debe a que el acero AISI 1045 es un material que se considera fácil de soldar y se pueden utilizar electrodos de este tipo.

Debido a que era el mismo análisis anterior, se utilizan las mismas ecuaciones y mismas consideraciones por lo cual la única diferencia son las propiedades del material de aporte. Según el Cuadro 12 se tiene una resistencia a la tensión S_{ut} de $427 MPa$ y una resistencia a la fluencia S_y de $345 MPa$

Realizando el procedimiento anterior se tiene el mismo esfuerzo de corte $0.315 MPa$ pero ahora el esfuerzo permisible es el siguiente

$$\tau_{perm} = 0.30 * 437 MPa$$

$$\tau_{perm} = 128.10 MPa$$

Con respecto al esfuerzo permisible del material base se tiene el mismo valor de $212 MPa$ ya que en este no hubo ningún cambio y por lo tanto el esfuerzo en el material debido a la soldadura tiene el mismo valor de $0.215 MPa$

En cuanto a los factores de seguridad, en el caso del material base se tiene el mismo valor de 1,235 por lo mencionado anteriormente pero sí se tiene un cambio con respecto al material de aporte. En este caso se tiene una resistencia al corte S_{Sy} de $172.5 MPa$ y por lo tanto el factor de seguridad de la soldadura es 547

También se realizó el cálculo del factor de seguridad a la fatiga. Para esto se siguió el procedimiento anterior con la teoría de Goodman. Para la resistencia al corte S_{Su} se tenía un valor de $286.09 MPa$ y para la resistencia S_{Se} se tiene un valor de $55.44 MPa$

Durante este proceso también se obtuvo el valor máximo del esfuerzo de corte. Para este se utilizó la misma concentración de esfuerzos por lo cual este también tenía un valor de $0.85 MPa$. Al ser igual que en el caso anterior los valores del esfuerzo de corte medio (τ_m) y alternante (τ_a) tenían un valor de

$$\tau_m = 0.43 MPa$$

$$\tau_a = 0.43 MPa$$

Con todos los valores mencionados se calculó el factor de seguridad a la fatiga considerando una soldadura con electrodo E60xx. Este tuvo un valor de

$$n_f = 109$$

Es importante mencionar que también se calculó el factor de seguridad a la fluencia utilizando la ecuación 49. Con los datos necesarios se obtuvo un valor final de

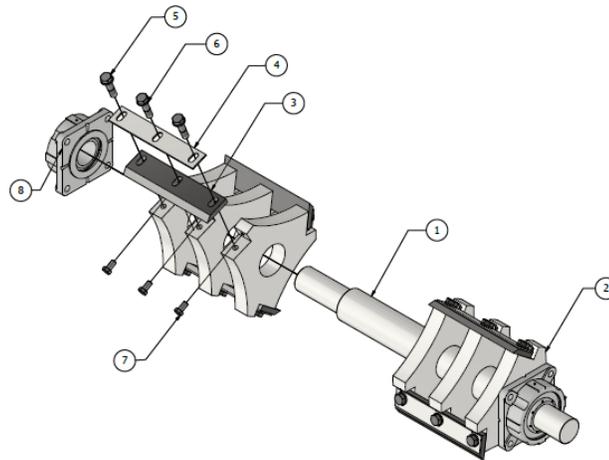
$$n_p = 405$$

6.3. Plan de fabricación y/o simulación

6.3.1. Fabricación

Se presenta el plan de fabricación para el sistema de trituración de la trituradora para Agreguima. Debido a las dimensiones de las piezas y en algunos casos, la geometría compleja, las piezas deben ser fabricadas en talleres externos que puedan trabajar con piezas de aproximadamente 1.5 m de largo y 0.5 m de ancho. A continuación, se presenta el sistema final y los componentes de este.

Figura 21: Sistema de trituración



Fuente: (Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.)

Cuadro 14: Lista de partes de sistema de trituración

Lista de partes		
Elemento	Cantidad	Nombre
1	1	Eje
2	6	Porta cuchilla
3	6	Cuchilla móvil
4	6	Seguro
5	18	Tornillo M22 x 2.5 x 90 Grado 8.8
6	18	Arandela plana DIN 125 M22
7	18	Tornillo M22 x 2.5 x 35 Grado 8.8
8	2	Chumacera F4BE 311-SRB-CRE

Fuente: (Elaboración propia)

6.3.2. Manufactura

Para la obtención de materiales de cada pieza se considera que estos se deben poder conseguir localmente ya que esto permite la facilidad de compra y disponibilidad en caso sea necesario algún repuesto.

Eje

Para el eje es necesario utilizar un torno el cual sea lo suficientemente largo para la longitud de la barra que se usará para la fabricación de la pieza. Esta máquina herramienta se utiliza para fabricar los hombros. Luego, utilizando una lima, se pueden eliminar los filos de la pieza. Las dimensiones se observan en la página 4 del juego de planos, en el anexo 12.2

Cuadro 15: Material para eje

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Acero AISI 1045	Manufactura externa	Q. 4,500.00	Tecniaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Porta cuchilla

Para la fabricación del porta cuchilla, este será fabricado en la misma empresa que el eje. Para este es necesario una fresadora vertical CNC para cumplir con la calidad de la pieza. En las páginas 2 y 3 del juego de planos, en el anexo 12.2 se observan las dimensiones necesarias para la realización de este. En cuanto a los agujeros roscados en la pieza es necesario utilizar un taladro y luego un machuelo para realizar la rosca.

Cuadro 16: Material para porta cuchilla

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Acero AISI 1045	Manufactura externa	Q. 24,108.00	Tecniaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Cuchilla móvil y fija

Para estas piezas se utiliza, de igual manera, una fresadora CNC para tener las dimensiones correctas presentadas en las páginas 5 y 6 del juego de planos presente en el anexo 12.2. Para la parte angular de la pieza es necesario utilizar una rectificadora para poder darle el filo a cada cuchilla.

Cuadro 17: Material para cuchilla móvil

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Acero AISI D2	Manufactura externa	Q. 6,600.00	Tecniaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Cuadro 18: Material para cuchilla fija

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Acero AISI D2	Manufactura externa	Q. 5,500.00	Tecniaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Seguro

En cuanto a la fabricación del seguro, esta es una geometría simple y se realiza, de igual manera, en una fresadora vertical CNC siguiendo las indicaciones presentadas en la página 7 del juego de planos en el anexo 12.2.

Cuadro 19: Material para seguro

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Acero AISI 1045	Manufactura externa	-	Tecniaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Criba

Para la realización de la criba es necesario realizar la compra de una lámina perforada de acero la cual debe tener las dimensiones establecidas en la página 10 del juego de planos, en el anexo 12.2. Teniendo esta, es necesario utilizar una roladora de lámina para poder darle el radio requerido según la medida en la página 11 del juego de planos.

Cuadro 20: Material para criba

Material	Manufactura	Costo material	Proveedor
Lámina acero A36	Manufactura externa	Q. 2,615.00	Proaceros
Fuente: (Elaboración propia)			

Se debe considerar un presupuesto para el taller aparte de los precios presentados para los materiales. También se debe tomar en cuenta el tiempo de fabricación ya que al ser un taller externo pueden tener otros proyectos por lo que este tiempo puede ser prolongado.

6.4. Protocolo de pruebas

6.4.1. Primera prueba

Se realizan dos pruebas para verificar el funcionamiento del módulo de cuchillas. La primera consiste en disminuir las RPM a las cuales se está trabajando ya que esto aumenta el torque y en consecuencia la fuerza aplicada. Se realiza para analizar el comportamiento del eje, porta cuchillas y cuchillas en caso sea necesario realizar esta operación. Este se evalúa utilizando el factor de seguridad de las piezas.

Equipo

Cuadro 21: Equipo para prueba 1

No.	Equipo
1	<i>Software</i> de simulación ANSYS
2	<i>Software</i> de diseño Autodesk Inventor®

Fuente: (Elaboración propia)

Procedimiento

Determinar los distintos valores de RPM que se utilizarán y la fuerza que estas provocan en las cuchillas. Ingresar los nuevos datos en el *software* de simulación y determinar el factor de seguridad de las piezas.

6.4.2. Segunda prueba

La segunda prueba consiste en realizar cambio de material en las cuchillas, eje y porta cuchillas para evaluar si esto tiene un efecto significativo en el comportamiento de las piezas, considerando que se aplica la misma fuerza de corte.

Equipo

Cuadro 22: Equipo para prueba 2

No.	Equipo
1	<i>Software</i> de simulación ANSYS
2	<i>Software</i> de diseño Autodesk Inventor®

Fuente: (Elaboración propia)

Procedimiento

Se determinan los materiales que pueden utilizarse para la fabricación del sistema de trituración, específicamente los porta cuchillas y eje. Luego es necesario definir las propiedades de estos, específicamente la resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y la razón de Poisson. Estos datos se ingresan en el *software* de simulación para luego poder determinar el factor de seguridad de las piezas dependiendo el material.

7.1. Requisitos

Cuadro 23: Cumplimiento de requisitos

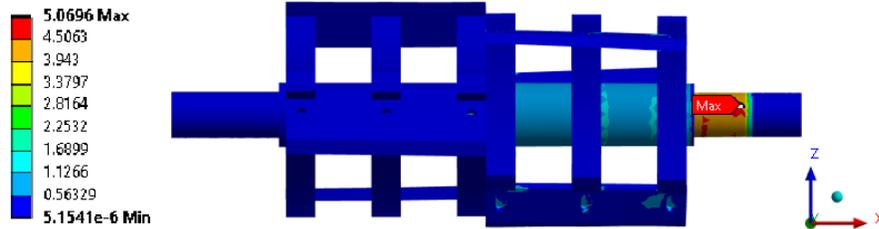
Código	Requisito	Cumple	Verificación
ST - 01	El sistema debe cortar plástico HDPE	Sí	Cálculos de potencia necesaria para cortar y resistencia de materiales de corte
ST - 02	El sistema debe cortar mínimo 150 kg/h	Sí	Cálculos de diseño teniendo en cuenta este flujo de material
ST - 03	El sistema debe tener un costo menor a \$4,000	No	La suma de los costos de manufactura y materiales excede el monto establecido
ST - 04	Se debe presentar un manual de fabricación completo del sistema	Sí	Se verifica al tener los planos completos del sistema con las especificaciones necesarias
ST - 05	Se debe presentar un manual de mantenimiento correcto de cada módulo	Sí	Se verifica al tener un manual de mantenimiento de las piezas importantes de cada módulo de la trituradora
ST - 06	Las cuchillas deben poder cortar una caneca de 20 L hecha de HDPE	Sí	Cálculo de diseño teniendo en cuenta las dimensiones

Código	Requisito	Cumple	Verificación
DF - 01	El factor de seguridad del sistema debe ser mayor a 2.5	Sí	Se verifica en las simulaciones realizadas utilizando el <i>software</i> ANSYS
DF - 02	El ancho de la caja de trituración no debe exceder 1.5 m	Sí	Juego de planos del sistema de trituración
DF - 03	El sistema de trituración debe ser fabricado con materiales que se puedan conseguir localmente	Sí	Cotizaciones para todos los materiales del sistema, de empresas nacionales
DF - 04	Las cuchillas deben ser fabricadas de acero	Sí	Se cuenta con cotizaciones del material
DF - 05	Los porta cuchillas deben ser fabricados de acero	Sí	Se cuenta con cotizaciones del material
DF - 06	El eje debe ser fabricado de acero	Sí	Se cuenta con cotizaciones del material
DF - 07	Se debe tener un factor de seguridad a la fatiga en los tornillos de sujeción mayor a 1.5	Sí	Factor de seguridad obtenido de cálculos con las consideraciones de diseño
DF - 08	Se debe tener un factor de seguridad a la fatiga mayor a 3 en las uniones realizadas por soldadura	Sí	Factor de seguridad obtenido de cálculos con las consideraciones de diseño
DF - 9	La deformación máxima del sistema de trituración debe ser menor a 1.5 mm	Sí	Simulaciones realizadas utilizando el <i>software</i> ANSYS
FN - 01	El tamaño de la hojuela triturada debe ser de 18 mm o menor	Sí	El plan de manufactura permite estas dimensiones
SG - 01	Se debe indicar el torque necesario para la sujeción de tornillos de cuchillas en el manual de mantenimiento	Sí	Definición de torque necesario para tornillos en manual

Fuente: (Elaboración propia)

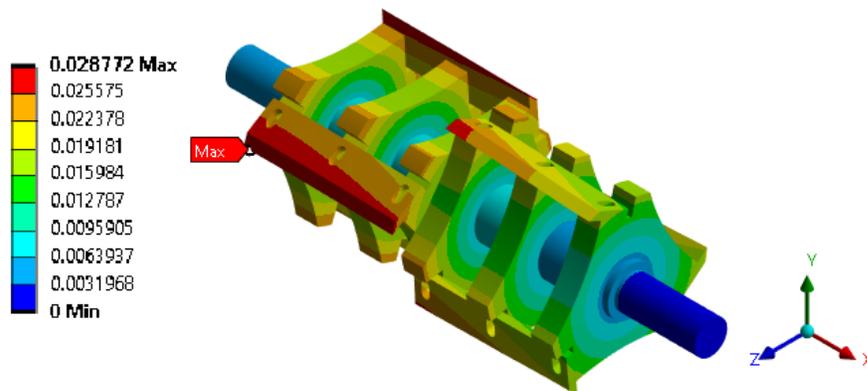
7.2. Simulación en *software* ANSYS

Figura 22: Esfuerzo von Mises máximo 5.07 MPa en eje de trituración



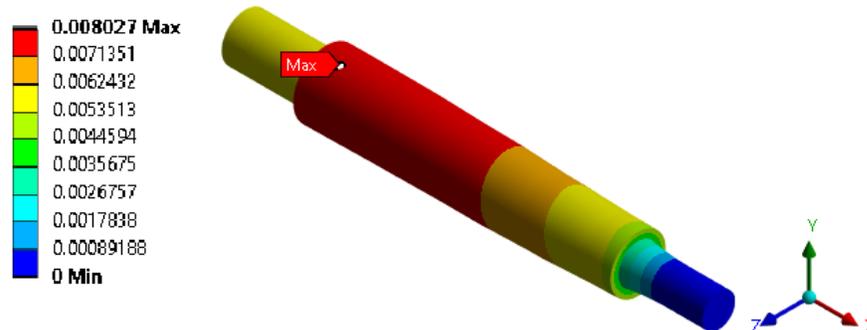
Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

Figura 23: Deformación máxima 0.03 mm en eje de trituración



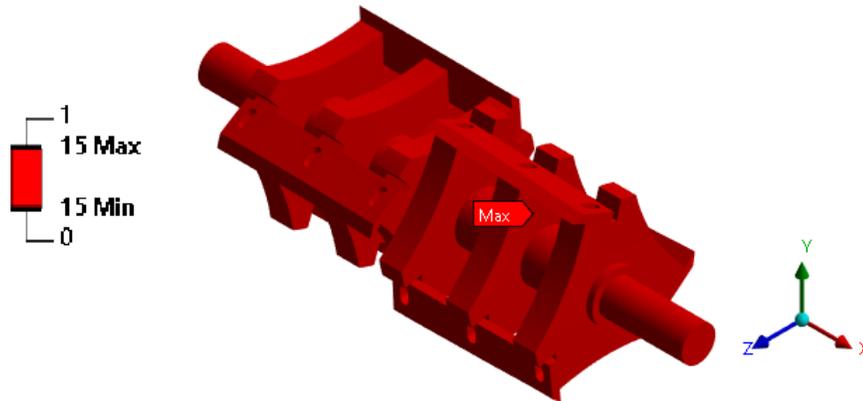
Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

Figura 24: Deformación máxima 0.01 mm en eje



Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

Figura 25: Factor de seguridad eje de trituración



Fuente: (Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.)

7.3. Rodamientos

Cuadro 24: Vida nominal de rodamientos escogidos

Rodamientos de pestaña cuadrada	Vida nominal (rev)
Rodamiento 1 F4BE 311-SRB-CRE	1.54×10^8
Rodamiento 2 F4BE 311-SRB-CRE	3.39×10^7

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 25: Horas de vida de rodamientos escogidos

Rodamientos de pestaña cuadrada	Horas de vida
Rodamiento 1 F4BE 311-SRB-CRE	3.85×10^9
Rodamiento 2 F4BE 311-SRB-CRE	8.46×10^8

Fuente: (Elaboración propia)

7.4. Tornillos de sujeción

Cuadro 26: Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en cuchillas móviles

Tipo de tornillo	Corte puro (MPa)	Cuchilla móvil	
		Tensión max. (MPa)	Aplastamiento (MPa)
M22 x 2.5 x 90	1.52	0.45	2.84

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 27: Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en seguro

Tipo de tornillo	Seguro	
	Tensión max. (MPa)	Aplastamiento (MPa)
M22 x 2.5 x 90	1.72	11.36

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 28: Factor de seguridad a la fatiga y fluencia de tornillos en cuchillas móviles

Tipo de tornillo	Factor de seguridad fatiga	Factor de seguridad fluencia
M22 x 2.5 x 90	1.84	1.33

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 29: Esfuerzos en tornillos sometidos a cortante en cuchillas fijas

Tipo de tornillo	Corte puro (MPa)	Cuchilla fija	
		Tensión max. (MPa)	Aplastamiento (MPa)
M22 x 2.5 x 50	1.14	0.49	2.84

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 30: Esfuerzos de tornillo sometido a cortante en lámina

Tipo de tornillo	Lámina	
	Tensión max. (MPa)	Aplastamiento (MPa)
M22 x 2.5 x 50	1.04	5.97

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 31: Factor de seguridad a la fatiga y fluencia de tornillos en cuchillas fijas

Tipo de tornillo	Factor de seguridad fatiga	Factor de seguridad fluencia
M22 x 2.5 x 50	1.84	1.33

Fuente: (Elaboración propia)

7.5. Soldadura electrodo E100xx

Cuadro 32: Esfuerzos aplicados y permisibles en material de aporte y base

Electrodo	Material de aporte		Material base	
	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)
E100xx	0.315	206.70	0.21	212

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 33: Factores de seguridad

Electrodo	Factor de seguridad mat. aporte	Factor de seguridad mat. base	Factor de seguridad a la fatiga	Factor de seguridad a la fluencia
E100xx	952	1,235	158	705

Fuente: (Elaboración propia)

7.6. Soldadura electrodo E60xx

Cuadro 34: Esfuerzos aplicados y permisibles en material de aporte y base

Electrodo	Material de aporte		Material base	
	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)
E60xx	0.315	128.10	0.21	212

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 35: Factores de seguridad

Electrodo	Factor de seguridad mat. aporte	Factor de seguridad mat. base	Factor de seguridad a la fatiga	Factor de seguridad a la fluencia
E60xx	547	1,235	109	405

Fuente: (Elaboración propia)

7.7. Pruebas realizadas

Cuadro 36: Factor de seguridad al aumentar RPM del motor

No. Prueba	RPM	Fuerza (N)	Factor de seguridad
1	600	1390	15
2	500	1668	15
3	300	2780	15

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 37: Factor de seguridad al cambiar material de porta cuchillas y eje

No. Prueba	Material	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Razón de Poisson	Factor de seguridad
1	Acero AISI 4140	485	814	0.29	15
2	Acero AISI 1045	530	625	0.29	15

Fuente: (Elaboración propia)

7.8. Cotización

Cuadro 38: Cotización de materiales para módulo de cuchillas

Cantidad	Descripción	Uso	Precio
1	Lámina acero A36	Criba	Q 2,615.00
1	Barra de acero AISI 1045	Eje	Q 4,500.00
6	Discos acero AISI 1045 (400 mm)	Porta cuchillas	Q 24,108.00
6	Placas rectangulares acero D2	Cuchillas móviles	Q 6,600.00
4	Placas rectangulares acero D2	Cuchillas fijas	Q 5,500.00
2	Chumaceras F4BR 311-SRB-CRE	Para eje	Q 23,340.00
Total			Q 66,663.00

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 39: Cotización de materiales para los tres módulos

Módulo	Costos
Estructura	Q 30,370.00
Sistema de potencia	Q 37,066.00
Sistema de trituración	Q 66,663.00
Total	Q 134,099.00
Total	\$ 17,236.38

Fuente: (Elaboración propia)

Cuadro 40: Cotización de trituradora completa

Establecimiento	Observación	Tiempo de entrega	Costo
Taller PROMINOX (Proyectos mecánicos e inoxidable)	Incluye transporte al centro de acopio 70 % del pago anticipado	12 semanas	Q 214,200.00
Taller Multimecánica	No incluye motor Diésel 60 % del pago anticipado	7 semanas	Q 370,500.00
Universidad del Valle de Guatemala	No incluye transporte al centro de acopio No incluye contratación de servicios externos para ensamble El módulo de cuchillas debe ser manufacturado en un taller externo	16 semanas	Q 270,000.00

Fuente: (Elaboración propia)

Análisis de resultados

Durante este proyecto se tenía como objetivo principal diseñar un sistema de trituración para la trituradora de plástico de polietileno de alta densidad con cuchillas que mantengan el filo por al menos 2 meses. Para esto fue necesario el cumplimiento de diversos requisitos para lograr los objetivos específicos. En el Cuadro 23 en la sección de resultados se observan la variedad de requisitos que se tenían durante el proyecto. Muchos de ellos se cumplen debido a que se toman en cuenta al dimensionar y elegir el material de las distintas piezas.

El requisito que no se logró cumplir fue el ST - 03. Este no se pudo alcanzar debido a que, al realizar la cotización de los materiales solamente, en el módulo de cuchillas, se utilizaba más de 2/3 del presupuesto de \$12,000 que iba a otorgar la empresa para la trituradora completa como se muestra en el Cuadro 38. El total elevado de la cotización se debe a la necesidad de la compra de 6 discos de acero para la fabricación de los porta cuchillas y también a las dos chumaceras para el eje. Este último valor también considera que estas se deben importar ya que no fue posible encontrarlas en Guatemala por lo cual, al hacer esto también interfiere con el requisito DF - 03 el cual establece que todos los materiales utilizados en el sistema de trituración debían ser conseguidos de manera local.

Sobre el presupuesto se establece que al agregar los materiales para el módulo de estructura y de potencia, se observa en el Cuadro 39 que el valor de estos estaba por encima de los \$12,000 sin tener en cuenta la manufactura y el transporte de la máquina. Es importante mencionar que al momento de realizar las distintas cotizaciones estas eran válidas por poco tiempo, en el caso del módulo de cuchillas esta tenía una validez de 2 días lo cual indica que durante este tiempo había una gran variación en los precios de distintos materiales, específicamente, el acero.

Debido al alto costo de materiales se decidió que no se fabricaría la trituradora en este momento. Teniendo esto en consideración se determinó que era necesario realizar cotizaciones en distintos talleres por si la empresa quisiera fabricarla en un futuro. En el Cuadro 40

se muestran 3 distintos establecimientos donde es posible la fabricación de la máquina, presupuesto y ciertas consideraciones importantes que pueden influir en el precio final de la fabricación de la trituradora. En este caso se establece que en todos los talleres el precio final es más elevado que el presupuesto original. Se determina que, teniendo en cuenta las distintas observaciones para cada taller, los costos finales de la fabricación son similares.

Una de las razones por las cuales el costo final es mayor a lo que se tenía presupuestado al comenzar el proyecto es debido al requisito DF - 03 mencionado anteriormente. Esto se debe a que la trituradora actual viene de China y no se cuenta con accesibilidad a los repuestos o a información importante sobre el funcionamiento y requerimientos de la máquina. También es importante mencionar que la máquina con la que se cuenta fue fabricada por una empresa que manufactura estas trituradoras y no solamente realizan una máquina. Cuentan con una línea de producción lo cual les permite poder reducir los costos de materia prima, manufactura, etc. y por lo tanto el precio total final es menor comparado con el proyecto realizado.

En cuanto a los requisitos relacionados con los esfuerzos y factores de seguridad se utilizaron distintos métodos para poder comprobar que los diferentes componentes con los que cuenta el sistema de trituración, no fallarían. En la sección 7.2 de los resultados se observa que se realizó una simulación utilizando el *software* ANSYS. En esta sección, en las figuras 22 y 23 se muestra un análisis de esfuerzos y deformación del eje del sistema de trituración. En el caso del esfuerzo equivalente von Mises se observa que el valor máximo se encuentra en el eje de trituración, específicamente en la sección derecha lo cual se debe a que ahí es donde este se conecta con el volante de inercia y las poleas del sistema de potencia para su funcionamiento. Teniendo esto en cuenta se observa el valor obtenido de esfuerzo máximo aplicado y se establece que este es significativamente menor a las resistencias de los distintos materiales utilizados para el sistema de trituración. Considerando tanto la defluencia como a la tensión de cada uno.

En cuanto a la deformación total del eje completo mostrado en la Figura 23 se observa que el valor máximo se da en las cuchillas. Específicamente se puede notar que se encuentra en las piezas donde se configura la fuerza de corte mostrado en el Figura 15 de la sección 6.2.4 de metodología. Esto indica que al momento en que 2 de las cuchillas se encuentran en contacto con el plástico HDPE, sufren cierta deformación pero esta tiene un valor de 0.03 mm lo cual se considera que no afecta de manera significativa al sistema. Es importante mencionar que con este resultado se comprueba el requisito DF - 10 ya que se tiene un valor menor a 1.5 mm .

Otro análisis realizado fue la deformación total solamente del eje del sistema. Esto se presenta en la Figura 24. Se realizó debido a que en esta pieza es donde se presentaba el esfuerzo von Mises máximo. Obteniendo los resultados se pudo observar que se tenía una deformación máxima de 0.008 mm pero esta se da en el extremo izquierdo del eje. El valor de deformación se considera bastante pequeño lo cual muestra que el torque realizado y la fuerza aplicada de corte, no causan daños o fallas en esta pieza del sistema.

Por último se decidió definir el factor de seguridad para todas las piezas que componen el eje del sistema de trituración. En este caso, en la Figura 25 se observa que tanto el valor máximo y mínimo es de 15 lo cual es mayor a 1 y se establece que, según la simulación realizada, ninguna de las piezas del sistema fallaran con la fuerza de corte aplicada. Es importante mencionar que con el *software* utilizado, el valor máximo que muestra, con

respecto al factor de seguridad, es de 15 por cual existe la posibilidad que el valor de este sea todavía más alto de lo presentado lo cual indica que los materiales son lo suficientemente resistentes para soportar las cargas.

Cabe mencionar que previo a estos resultados se realizaron ciertas pruebas respecto al material para poder determinar cuál sería el mejor para las distintas piezas. Al iniciar se estaba considerando un acero AISI 4140 debido a la alta resistencia a la tensión pero al realizar la primera simulación se tenían valores de esfuerzo y deformación bastante bajos. Es por esto que se decidió buscar la posibilidad de utilizar otro material. En el Cuadro 37 se observan los resultados obtenidos al utilizar 2 materiales diferentes con distintas resistencias tanto a la fluencia como a la tensión. Para cada prueba se aplicaron las mismas condiciones y en ambos casos se obtuvo valores de esfuerzos y deformaciones similares por lo tanto al final se tenía un factor de seguridad de 15. Esto quiere decir que se puede escoger un material con valores de resistencia menor y la fuerza de corte todavía no provoca que las piezas fallen. Después de realizadas estas pruebas se decidió elegir el acero AISI 1045 para el resto del proyecto ya que este de igual forma representaba un gasto menor que utilizar acero AISI 4140. Relacionado con lo anterior se establece que respecto a las cuchillas no se hace un cambio de material ya que para estas es necesario que se tenga una alta resistencia al desgaste para que estas puedan ser de uso prolongado.

Una vez determinado esto también se realizó otra prueba para comprobar qué comportamiento tendrían las piezas al utilizar este material. En este caso se decidió realizar variaciones en las RPM para cambiar la fuerza. Esto se muestra en el Cuadro 36. En este se pudo determinar que aún cuando la fuerza de corte aplicada es más del doble que es necesaria para el corte de HDPE (1, 250 N), y utilizando el material acero AISI 1045 para el eje y porta cuchillas, el factor de seguridad continúa con un valor de 15 lo cual indica que los materiales escogidos son lo suficientemente resistentes para las cargas que se están aplicando. Se pudo determinar que si en algún momento es necesario realizar algún cambio el cual resulte en un aumento de la fuerza de corte, el material escogido podrá resistirlo.

En el caso de los rodamientos necesarios para el eje de trituración se calcularon los ciclos que durarían estas piezas así como también las horas de vida. Esto se muestra en los cuadros 24 y 25 respectivamente. En ambos casos se puede determinar que se tienen valores que se consideran elevados lo cual también muestra que este no es un componente que fallaría al poco tiempo de uso de la maquinaria. Cabe mencionar que para estos puedan funcionar correctamente y puedan cumplir con su vida útil esperada, se les debe dar el mantenimiento correcto el cual se presenta en el manual de mantenimiento.

Una de las piezas más importantes del sistema de trituración son los tornillos de sujeción tanto para las cuchillas fijas como para las móviles. Esto debido a que si uno de ellos falla, puede provocar serios daños a la máquina. Para estas piezas se determinaron los esfuerzos que se estarían generando debido a la fuerza de corte aplicada. En el Cuadro 26 se presentan los distintos esfuerzos que se generan en el tornillo y en la cuchilla móvil. En el Cuadro 27 se presentan los resultados pero para el seguro. Se observa que en el caso del aplastamiento, se tiene un valor más elevado en el seguro al igual que en la tensión máxima. Esto se debe a que el seguro tiene un espesor y propiedades de material menores comparado con el acero AISI D2 utilizado para las cuchillas. Esto no es un inconveniente ya que en todo caso hubiera alguna falla en el sistema relacionado con los tornillos de sujeción, el seguro es un elemento el cual no es necesaria una alta inversión para reemplazar como sería el caso de las cuchillas.

Es importante considerar que, a pesar que se tienen esfuerzos mayores en el seguro, en general todos los valores de esfuerzo son considerablemente menores a las resistencias de los materiales que se están utilizando en las distintas piezas del sistema. Esto se relaciona con el punto mencionado anteriormente que existe cierto sobredimensionamiento con respecto a los materiales.

Continuando con el análisis de estos elementos de sujeción, debido a que la carga que se les aplica es dinámica y a la precarga, en el Cuadro 28 se presenta el factor de seguridad por fatiga y fluencia. Para la fatiga se tiene un valor de 1.84 y para la fluencia un valor de 1.33 por lo tanto es mayor a 1. Con esto se establece que los elementos no fallarán por la fatiga generada debido a la fuerza que se les está aplicando constantemente. Se pudo establecer que el mayor esfuerzo se debe a la precarga aplicada al perno y no a la fuerza de corte aplicada. A pesar de esto se demuestra el cumplimiento del requisito DF - 07 ya que se tiene un valor mayor a 1.5.

Respecto a las cuchillas fijas, en los cuadros 29, 30 y 31 se presentan los resultados que se obtuvieron en los tornillos utilizados. Se observa que en su mayoría se tienen esfuerzos menores comparado con las cuchillas móviles lo cual se debe a que en este caso se tienen 4 tornillos por lo cual la fuerza aplicada en cada uno es menor. En el caso del factor de seguridad se observa que para la fatiga también se tiene un valor de 1.84 y para la fluencia se tiene el mismo valor de 1.33. Al ser mayor a 1 se determina que estos no fallarán y también se cumple el requisito DF - 07 ya que se tiene un valor mayor a 1.5.

Otro de los análisis realizados fue en la unión de los porta cuchillas con el eje del sistema de trituración. Estos elementos se deben soldar y es de suma importancia que estas no fallen ya que esta es la base para la colocación de las cuchillas de corte. Como se observa en los resultados se tienen los esfuerzos aplicados y factores de seguridad para un electrodo E100xx y E60xx. Al realizar una comparación, entre los esfuerzos para el material de aporte y base dependiendo el electrodo, presentado en los cuadros 32 y 34, se puede notar que para el material base se tiene el mismo esfuerzo aplicado y permisible. Es importante mencionar que el esfuerzo aplicado en el material base no es elevado y es significativamente menor al esfuerzo permisible del material.

En cuanto al esfuerzo aplicado y permisible en el material de aporte, al utilizar cualquier electrodo el esfuerzo es el mismo pero hay un cambio en el valor permisible según el código AISC. Debido a que el electrodo E60xx tiene propiedades de resistencia menores es coherente que el esfuerzo permisible sea menor. A pesar de esto el valor de esfuerzo es pequeño en ambos casos por lo cual, para la soldadura, se podría aplicar ambos electrodos.

Teniendo esto en consideración, como ya se mencionó, se definieron distintos factores de seguridad los cuales se presentan en el Cuadro 33 para el electrodo E100xx y Cuadro 35 para el E60xx. Se determina que el factor en el material base es el mismo y no hay influencia del tipo de electrodo. Este es bastante elevado por lo cual se establece que el material no fallará por la soldadura. En el caso del factor de seguridad del material de aporte, evidentemente será menor para el electrodo E60xx por sus propiedades. A pesar de esto ambos factores son mayores a 1 y se considera que son elevados por lo que también se establece que el material de soldadura no fallará. También se calculó el factor de seguridad a la fatiga y a la fluencia debido a que la carga aplicada es dinámica. Estos también son bastante mayores a 1 por lo cual tampoco se tendrá una falla ni por fatiga ni por fluencia en la soldadura.

Estos resultados son importantes ya que comprueban el requisito DF - 09 ya que se tienen factores de fatiga mayores a 3. También se utilizó esta información para establecer que el electrodo seleccionado para realizar las soldaduras en el sistema de trituración será el E60XX, específicamente E6011. Se toma esta decisión ya que se está soldando acero AISI 1045 el cual se sabe que es fácil de soldar y no se requiere un electrodo muy especializado. Es importante mencionar que también se hace el cambio ya que en general los esfuerzos en las diferentes piezas son pequeños y en este caso sucede lo mismo por lo que no es necesario tener un material de aporte que tenga propiedades de resistencia mayores a las del acero AISI 1045.

Para finalizar es importante mencionar que en cuanto al requisito ST - 04, los planos del sistema de trituración se presentan en la sección 12.2 de los anexos. Con respecto al requisito ST - 05 el manual de mantenimiento se presenta en la sección 12.1 de los anexos. En este se incluye qué tareas de mantenimiento se deben realizar, las herramientas a utilizar, procedimiento y consideraciones importantes para el mantenimiento de cada módulo de la trituradora para plástico HDPE.

1. Se diseñó el sistema completo de trituración teniendo en consideración la capacidad de 150 *kg/h*. No se logró cumplir con el presupuesto de \$12,000 debido a los costos altos de materiales de todos los módulos, pero especialmente del sistema de trituración. Debido a esto no se llegó a fabricar la trituradora.

2. Se estableció que se utilizaría un sistema de cuchillas fijas y móviles teniendo 6 en el eje rotativo y 4 de manera fija en la estructura. Con este sistema se logra que dos cuchillas corten el plástico HDPE al mismo tiempo lo cual vuelve el proceso bastante rápido considerando el flujo de material para el que se desea utilizar.

3. Para las cuchillas, tanto fijas como móviles, se decide utilizar acero AISI D2 debido a que tiene una gran resistencia al desgaste y dureza, así como también una estabilidad dimensional.

4. Se establece que en general, en todas las piezas y uniones del sistema de trituración, los esfuerzos que genera la fuerza de corte son pequeños por lo cual se tienen factores de seguridad de fatiga, fluencia, corte, etc. elevados y se determina que estas piezas no fallarán por estos esfuerzos.

5. Se realizaron los planos de construcción del sistema de trituración completo utilizando el *software* Autodesk Inventor®. En estos se encuentran indicaciones importantes para la fabricación de algunas piezas. También se incluyen notas para el ensamblaje de los componentes con el módulo de estructura.

6. Se realizó el manual de mantenimiento para la trituradora completa. En este se incluyen los tres módulos definidos en el proyecto. En este se establecen las piezas más importantes que se deben revisar cada cierto tiempo. También se incluye el mantenimiento que se les debe realizar para que funcionen correctamente, así como también las herramientas y procedimiento necesario para hacerlo.

7. En el caso del sistema de trituración, en el manual de mantenimiento se establece la forma en que se deben reemplazar las cuchillas. También se establecen las herramientas

necesarias para esto así como también se mencionan notas importantes para su afilamiento y ajuste correcto.

8. Es importante mencionar que, debido a que no se fabricó la trituradora de polietileno de alta densidad, no se pudo definir con claridad cuanto tiempo dura un *set* de cuchillas para poder establecer con certeza que estas mantienen el filo por al menos dos meses.

Una recomendación importante es que en el momento que se quiera realizar esta máquina se haga una nueva cotización de materiales ya que al momento de hacer las presentadas en la sección de resultados, se encontraba en una época donde existía mucha variación en los precios del acero. En todo caso sea una época más estable, se espera que los precios no tengan mucha variación y si se hace cambio de material se tendría un costo total menor.

Otra recomendación es evaluar si existe la posibilidad de triturar otro tipo de plástico como el tereftalato de polietileno (PET). Se puede establecer si solamente es necesario un cambio en las RPM del motor y por lo tanto en la fuerza de corte o si se debe hacer un cambio en el diseño y geometría de las cuchillas o en el material y tratamiento de estas.

Debido a que los materiales utilizados tienen resistencias altas comparadas con los esfuerzos generados, se recomienda determinar si se puede aumentar la producción de plástico HDPE triturado y, por lo tanto, se tendría un mejor beneficio comparado con el costo de materiales y manufactura de la trituradora para plástico.

- Adepo, S. & Obanoyen, N. (2017). Design And Construction of a Plastic Shredding Machine. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 4(9), 4. <http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42352395.pdf>
- AlBahrani, O., AlHajjaj, O., AlQahtani, A. & AlDossary, M. (2020). *Paper Shredder Design* (Tesis doctoral). Prince Mohammad Bin Fahd University. https://www.pmu.edu.sa/attachments/academics/pdf/udp/coe/dept/me/fall2020_2021/paper_shredder_design_report.docx.pdf
- Alvarado, W., Chicoma, J., Meneses, B. & Nuñez, L. (2021). Design of a Plastic Shredding Machine to Obtain Small Plastic Waste. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 6. https://thesai.org/Downloads/Volume12No6/Paper_54-Design_of_a_Plastic_Shredding_Machine.pdf
- Aryani, N., Buchori, D. & Budi, A. (2019). Design of a Plastic Shredder Machine. *Journal of Proceedings*, 5.
- Atadious, D. & Oyejide, J. (2018). Design and Construction of a Plastic Shredder Machine for Recycling and Management of Plastic Wastes. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9(5), 7. https://www.researchgate.net/profile/Oluwayomi-Joel/publication/325660962_Design_and_Construction_of_a_Plastic_Shredder_Machine_for_Recycling_and_Management_of_Plastic_Wastes/links/5b1bdce2aca272021cf450b0/Design-and-Construction-of-a-Plastic-Shredder-Machine-for-Recycling-and-Management-of-Plastic-Wastes.pdf
- Ayo, W., Olukunle, O. & Adelabu, D. (2017). Development of a Waste Plastic Shredding Machine. *International Journal of Waste Resources*, 7, 4. <https://pdfcoffee.com/development-of-a-waste-plastic-shredding-machine-2252-5211-1000281-pdf-free.html>
- Bravo, J. (2017). *Diseño y Construcción de un Prototipo Industrial de una Máquina Trituradora de Plásticos* (Tesis doctoral). Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39657/u807000.pdf?sequence=1>
- Budynas, R. & Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9na). Editorial McGraw Hill.

- Canals, A. (2012). *Propuesta y análisis de la configuración geométrica de las cuchillas de un molino triturador de plástico*. Universidad de Holguín. <https://repositorio.uho.edu.cu/bitstream/handle/uho/5851/Trab%20Diploma%20%20%20Arianna%20S%20Canals%20Medina%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Capelo, J. & Velasco, J. (2021). *Diseño de una máquina trituradora de plástico para el sector rural Punta la Piedra*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54878/1/T-112238%20Capelo%20Santos%2c%20Jonathan%20Fernando%20%26%20Velasco%20Quispe%2c%20Jorge%20Eduardo.pdf>
- Caviedes, J. (2020). *Diseño de una máquina Trituradora para plástico PET* (Tesis doctoral). Fundación Universidad de América. Bogotá. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7904/1/4131632-2020-1-IM.pdf>
- Chimborazo, C. (2016). *Estudio de un sistema de trituración de botellas de tereftalato de polietileno, para reducir la contaminación por desechos plásticos en el botadero de la ciudad de Ambato* (Tesis doctoral). Universidad Técnica de Ambato.
- CropLife. (s.f.). CampoLimpio una solución ambiental para el Agro. <https://www.croplifela.org/es/proteccion-cultivos/campolimpio>
- Dattatraya, P. & Manoj, S. (2020). Cutter blade design for Shredder Machine. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 10(6), 6. <http://www.ijsrp.org/research-paper-0620/ijsrp-p102124.pdf>
- en reciclaje de plástico, E. (2019). *AFILADO DE CUCHILLAS (NAVAJAS) PARA MOLINO DE TRITURACIÓN DE PET*. https://www.youtube.com/watch?v=f4qcOBL_zQ&t=232s
- EUROPE, N. (s.f.). *Cómo seleccionar el rodamiento y la disposición adecuados*. Technical Insight.
- Gamarra, A., Taipe, J., Arellano, M., Lozano, Y., Samaniego, P. & Serpa, C. (2017). Diseño de un prototipo de trituradora para mejorar el rendimiento de trituración de botellas tipo PET.
- García, J. M., Durán, C. S., Ramón, V. H. & Anzaldo, S. B. (2011). *Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato (PET)*. [http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20\(PET\).pdf](http://www.redisa.net/doc/artSim2011/TecnologiasParaElManejoDeResiduosSolidos/Dise%C3%B1o%20de%20una%20trituradora%20para%20pl%C3%A1stico%20Polietileno%20de%20Tereftalato%20(PET).pdf)
- García, L., Ponce, C., Martínez, E. & León, J. (2014). Diseño Y Prototipo de una máquina trituradora de PET. *CULCyT*, 54(1), 9.
- GoodFellow. (s.f.). *Polyethylene—High Density*. GoodFellow Innovation, delivered.
- Hernández, J. & Fonseca, D. (2017). *Diseño de una trituradora de residuos sólidos tipo PET para la Fundación Alianza Forestal de Colombia E.S.P.* (Tesis doctoral). Universidad Pedagógica de Tecnológica de Colombia. Duitama, Boyacá. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2640/1/TGT_1254.pdf
- INIFINITA. (2022). *Termoestables y Termoplásticos*. INIFINITA INDUSTRIAL CONSULTING. <https://www.inifinitaresearch.com/noticias/termoestables-y-termoplasticos-definicion-y-diferencias/>
- León, D., García, B. & Ramos, A. (2012). *ANÁLISIS DE CUCHILLAS DE MOLINO PARA TERMOPLÁSTICOS MOD.2650 Y DISEÑO PARA UNA MAYOR DURACIÓN*.
- MaxiPet. (s.f.). Envases para insecticidas o agroquímicos. <https://maxipet.net/blog/envases-para-insecticidas-o-agroquimicos>

- Mayorga, J. (2016). *Análisis y Optimización de un Molino de Trituración para Envases Desechables PET* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica Salesiana. Quito. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13624/3/UPS-KT00281.pdf>
- Millones, J. (2014). *Diseño de un Molino de cuchillas de 300 kg/h para la molienda de plásticos sólidos HDPE*,. Grupo Dimarsa SAC. - Puente Piedra (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Callao. Perú. http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/252/Jos%5C%c3%5C%a9Luis_Tesis_titulo profesional_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Miranda, W. (2014). *DISEÑO DE UNA MÁQUINA TRITURADORA DE PLÁSTICO PARA LA FÁBRICA LA PAZ*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Monteza, W. (2019). *Diseño de una máquina trituradora de botellas plásticas de 100kg/h para optimizar su transporte y almacenamiento en la empresa recicladora Planeta Verde EIRL - Chiclayo*. Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/38572/Monteza_LW.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Nikitha, S., Supriya, K., Tamanjeet, S., Ravi, K. & Ranga, C. (2020). Design and manufacture of Portable Automatic Plastic Shredder. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(5), 5. <https://www.irjet.net/archives/V7/i5/IRJET-V7I5347.pdf>
- Ogunedo, B. & Chuckwudi, B. (2020). Design and Construction of a Low Cost Plastic Shredding Machine. 7(9), 12. https://www.ijrrjournal.com/IJRR_Vol.7_Issue.9_Sep2020/IJRR0052.pdf
- Ola, A. (2019). Por mal manejo de plaguicidas aumenta el número de intoxicados. <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/por-mal-manejo-de-plaguicidas-aumenta-el-numero-de-intoxicados/>
- Orozco, J. (2019). ¿Qué son los aceros rápidos? <https://blog.laminasyaceros.com/blog/que-son-los-aceros-rapidos>
- Pedraza, C., Pelegrina, M. & Pertúz, G. (2018). Analysis by Means of the Finite Element Method of the Blades of a PET Shredder Machine with Variation of Material and Geometry. *International Journal of Computational Engineering and Sciences*, 11(83). <http://www.m-hikari.com/ces/ces2018/ces81-84-2018/p/pedrazaCES81-84-2018.pdf>
- Raji, A., Kuku, O., Ojo, S. & Hunvu, M. (2020). Design Development and Performance Evaluation of Waste Plastic Shredder. *Journal of Production Engineering*, 23(1), 8.
- Recimex. (2015). *Guía básica para el mantenimiento de un molino de cuchillas para plásticos*. Recimex Innovación En Reciclaje. <http://www.recimex.com.mx/blog/?p=325#:~:text=En%20cada%20cambio%20de%20cuchillas%3A&text=%E2%80%93%20Revisar%20que%20las%20cuchillas%20no,de%20los%20tornillos%20de%20fijaci%C3%B3n.>
- SKF. (s.f.-a). Roller bearing units. #100 - 700. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680a96c3b/pdf_preview_medium/0901d19680a96c3b_pdf_preview_medium.pdf#cid=556867
- SKF. (s.f.-b). SKF ConCentra roller bearing units. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968007f949/pdf_preview_medium/0901d1968007f949_pdf_preview_medium.pdf#cid=259549
- Tecniaceros. (s.f.). Acero herramienta. <http://tecniaceros.com/productos/acero-herramienta/>

- Valdés Atencio, J. L. & San Martín Pacheco, E. A. (2009). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo-predictivo aplicado a los equipos de la empresa Remaplast* (Tesis doctoral). Universidad de Cartagena.
- Vásconez, A. (2013). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PLÁSTICOS DE 15 KG/H PARA EL LABORATORIO DE CONFORMADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5901/1/CD-4717.pdf>
- Vela, C., Rey, E. & Jaimes, A. (2018). *Diseño y construcción de prototipo de trituración para PET* (Tesis doctoral). Universidad Cooperativa de Colombia. Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5eed1e71-c5ef-43c4-8e52-e4b81f0be8b5/content>
- Wong, J., Gan, M., Chua, B., Gakim, M. & Siambun, N. (2021). Shredder Machine for Plastic Recycling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1217(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1217/1/012007>

CAPÍTULO 12

Anexos

- 12.1. Manual de mantenimiento de trituradora de plástico HDPE
- 12.2. Planos de construcción de sistema de trituración



MANUAL DE MANTENIMIENTO

TRITURADORA DE PLÁSTICO HDPE

2023

ÍNDICE

MÓDULO DE ESTRUCTURA	1
Guía de frecuencia de mantenimiento de elementos en la estructura	1
Ajuste de pernos	2
Herramientas y equipo	2
Procedimiento	2
Revisar y añadir aceite a tornillo de potencia y bisagras	3
Herramientas y equipo	3
Procedimiento	3
Pintar o retocar pintura de trituradora	4
Herramientas y equipo	4
Procedimiento	4
SISTEMA DE TRITURACIÓN	5
Cambio y ajuste de cuchillas	5
Herramientas y equipo	5
Procedimiento	5
Redefinición de rosca	7
Herramientas y equipo	7
Procedimiento	7
Afilar cuchillas	8
Herramientas y equipo	8
Procedimiento	8
Mantenimiento de criba	10
Herramientas y equipo	10
Procedimiento	10
Lubricación de chumaceras	11
Herramientas y equipo	11
Procedimiento	11
MÓDULO DE POTENCIA	12
Guía de frecuencia de mantenimiento general de motor	12

Ajuste de tornillos y pernos.....	13
Herramientas y equipo	13
Procedimiento.....	13
Revisar y añadir aceite al motor	15
Herramientas y equipo	15
Procedimiento para revisar y añadir aceite al motor	15
Cambio de aceite y reemplazo de filtro	16
Herramientas y equipo	16
Procedimiento para cambio de aceite y filtro de aceite	17
Reemplazar filtro de aire.....	18
Herramientas y equipo	18
Procedimiento para reemplazo de filtro de aire	18
Reemplazo de filtro de combustible	19
Herramientas y equipo	19
Procedimiento para cambio de filtro de combustible	19
Revisión de fugas de aceite o combustible	20
Herramientas y equipo	20
Procedimiento para revisión de fugas de aceite o combustible	20
Revisión de boquilla de inyección	21
Herramientas y equipo	21
Procedimiento de revisión de boquilla de inyección	21
Revisión de bomba de inyección.....	22
Herramientas y equipo	22
Procedimiento.....	22
Ajuste de válvulas de admisión y de escape de motor	23
Herramientas y equipo	23
Procedimiento de ajuste de válvula de admisión y escape de motor	23
Reemplazo de anillo de pistón	24
Herramientas y equipo	24
Procedimiento para reemplazo de anillo de pistón	24

MÓDULO DE ESTRUCTURA

Guía de frecuencia de mantenimiento de elementos en la estructura

 Revisar/ Añadir  Reemplazar				
ELEMENTO	HORAS DE OPERACIÓN			
	Todos los Días	Cada 30 hrs	Cada 100 hrs	Cada 250 hrs
Revisar el ajuste de tornillos y pernos				
Limpiar portacriba, después de cada uso				
Limpiar máquina con trapo seco				
Limpiar área de volantes de inercia				
Lubricar tornillo de potencia				
Limpieza de tolva de extracción				
Lubricar bisagras				
Retoca pintura de la estructura				

NOTA: USAR ACEITE MINERAL PARA LA LUBRICACIÓN DEL TORNILLO Y LAS BISAGRAS

Ajuste de pernos

El ajuste de pernos se debe revisar con una inspección rápida cada día. Verificar que no existan tornillos y pernos flojos en las guardas de seguridad y alza.

Herramientas y equipo

1. Llave matraca o de trinquete



2. Juego de copas



3. Set de llaves combinadas



4. Trapo de microfibra



Procedimiento

1. Verificar si los pernos se encuentran flojos, apretarlos lo suficiente con el *ratchet*.
2. Si se observa suciedad en los pernos, utilizar herramienta adecuada para remover pernos.
3. Luego de remover los pernos, limpiar con el trapo la suciedad que se encuentre entre estos.
4. Colocar de nuevo los pernos, ajustarlos con las herramientas correspondientes, apretar con un torque de 510 Nm.

Revisar y añadir aceite a tornillo de potencia y bisagras

Se deberá añadir aceite de tipo mineral para asegurar un correcto funcionamiento del mecanismo de subida y bajada de la tolva de entrada cada 30 horas de operación. Lo ideal es que este siempre permita al operario abrirla o cerrarla sin ejercer mucha fuerza.

Las bisagras se deben lubricar cada 100 horas, o si en caso llegan a producir algún ruido.

Herramientas y equipo

1. Aceitera



Procedimiento

1. Revisar que el timón del mecanismo del tornillo de potencia pueda girar sin problemas.
2. Añadir el aceite con la aceitera desde la parte alta del tornillo, girando el timón para asegurar que la capucha se lubrique internamente.
3. Lubricar bisagras con aceitera en los puntos de inflexión de esta.

Pintar o retocar pintura de trituradora

Se deberá retocar aquellas partes de la trituradora donde se esté despintando ya que, al ser pintura anticorrosiva, no permite que la oxidación se prolongue o suceda.

Herramientas y equipo

1. Pintura anticorrosiva (verde y roja)



2. Brocha de cerdas



Procedimiento

1. Revisar la pintura de la trituradora y retocar las áreas que estén presentando algún tipo de desgaste en la pintura.

SISTEMA DE TRITURACIÓN

Cambio y ajuste de cuchillas

Realizar el cambio de cuchillas cuando se note que el material triturado es polvoriento y no uniforme, el rendimiento de la máquina es menor, hay más ruido cuando se trabaja, etc. Esto indica que las cuchillas están perdiendo filo y es necesario reemplazarlas con cuchillas que estén afiladas. Es importante que se revisen los bordes de las cuchillas regularmente dependiendo de la carga de trabajo que se tenga ya que esto influye en el tiempo que hay entre reemplazos y de esta manera se pueden afilar antes que comiencen a mostrar problemas.

Herramientas y equipo

1. Guantes



2. Set de Llaves combinadas



3. Cepillo de cerdas de alambre



4. Cepillo de cerdas de plástico (Opcional)



5. Mazo de hule



6. Galgas



7. Torquímetro



Procedimiento

1. Siempre colocarse guantes especiales cuando se estén manejando las cuchillas para evitar riesgos de corte.
2. Tener fijo el rotor para evitar accidentes al momento de remover y colocar las cuchillas.

3. Utilizar set de llaves combinadas para aflojar los tornillos de las cuchillas fijas siempre dejando los tornillos centrales de último y luego removerlas.
4. Utilizar set de llaves combinadas para aflojar los tornillos de las cuchillas móviles siempre dejando de último el tornillo central y luego removerlas.
5. Utilizar un cepillo de cerdas de alambre y uno de plástico para poder limpiar y eliminar cualquier material que pueda estar en la base de los porta cuchillas.
6. Revisar que no haya ningún elemento en las bases antes de colocar las nuevas cuchillas.
7. Colocar primero las cuchillas fijas delanteras siempre colocando los tornillos centrales al inicio.
8. No apretar completamente los tornillos.
9. Colocar las cuchillas móviles y seguro colocando primero el tornillo central.
10. No apretar completamente los tornillos.
11. Utilizar un mazo de hule (o algún material que no dañe las cuchillas) para mover levemente las cuchillas fijas.
12. Utilizar los tornillos en los porta cuchillas para ajustar cuchillas móviles.
13. Utilizar las galgas para establecer un espacio entre cuchillas móviles y fijas de 0.2 a 0.3 mm.
14. Una vez establecida que la distancia es correcta, apretar los tornillos con un torque de 650 Nm utilizando un torquímetro.
15. Verificar que luego de apretar no haya habido un cambio en la distancia entre cuchillas utilizando las galgas.
16. Si hubo un cambio en la distancia de aflojan un poco los tornillos y se reajusta. Si no hubo cambio se continúa a colocar las cuchillas fijas traseras.
17. No apretar completamente los tornillos
18. Utilizar mazo de hule para mover las cuchillas fijas y galgas para medir que la distancia con las cuchillas móviles se encuentre entre 0.2 a 0.3 mm.
19. Apretar tornillos con un torque de 650 Nm.
20. Revisar que no hay cambio en las distancias ni tope entre cuchillas previamente a trabajar.

*NOTA 1: SIEMPRE VERIFICAR DISTANCIA. ENTRE MÁS GRANDE SEA, PEOR SERÁ EL CORTE.

*NOTA 2: DESPUÉS DE CADA TRABAJO DE TRITURACIÓN REALIZAR UNA LIMPIEZA COMPLETA DE LAS CUCHILLAS PARA ELIMINAR CUALQUIER MATERIAL QUE PUEDA CUASAR DAÑOS A LAS CUCHILLAS AL REALIZAR OTRO TRABAJO.

Redefinición de rosca

Es importante que cada 3 meses se evalúen las roscas de los porta cuchillas y de ser necesario, se redefina la rosca de los agujeros para que el agarre del tornillo de sujeción sea el correcto.

Herramientas y equipo

1. Machuelo



2. Maneral



3. Aceitera



Procedimiento

1. Colocar el machuelo en el maneral y apretar
2. Utilizar la aceitera para lubricar el machuelo
3. Tener fijo el rotor para evitar accidentes
4. Deslizar el machuelo poco a poco para poder definir nuevamente la rosca en los agujeros.
5. Sacar y meter el machuelo para romper las virutas y mantener el orificio libre de rebaba.
6. Continuar lubricando hasta que se termine de definir la rosca.

Afilar cuchillas

El proceso de afilamiento de las cuchillas se realiza cuando se dan las situaciones mencionadas en la página 6. Las cuchillas que se retiran para hacer el cambio necesitan pasar por este proceso.

Herramientas y equipo

1. Guantes



2. Lentes de protección



3. Transportador



4. Máquina afiladora con refrigerante



Procedimiento

1. Utilizar los guantes cuando se estén manejando las cuchillas
2. Colocar la cuchilla en la máquina afiladora de manera que el filo se encuentra de manera recta. (No es necesario colocar todos los tornillos)
3. Utilizar el transportador para verificar que la cuchilla se encuentre completamente horizontal y que se tenga un ángulo 0° en las cuchillas.



4. Si existe algún ángulo en alguna de las mediciones, es necesario realizar el ajuste de la cuchilla, ya sea la altura o el ángulo de inclinación completa de esta.
5. Una vez todos los ajustes sean realizados, colocarse los lentes y encender la máquina.
6. Cuando se esté trabajando, siempre utilizar refrigerante.
7. Hay que considerar que las cuchillas generalmente se pueden afilar de 60 a 80 veces.

Mantenimiento de criba

Es importante realizarle mantenimiento a la criba ya que sin este el espacio entre esta pieza y los bordes de las cuchillas puede aumentarse. Esto puede provocar una obstrucción en la criba. Se deben evaluar los agujeros cada cierto tiempo ya que, si estos comienzan a agrandarse y deformarse, las hojuelas de plástico ya no tendrán el tamaño requerido y es necesario cambiarla.

Herramientas y equipo

1. Vernier



2. Trapo de microfibra



Procedimiento

1. Al colocar la criba revisar que no haya tope con ninguno de los bordes de las cuchillas para verificar que no ocurra ningún accidente
2. Medir la distancia entre las cuchillas y la criba para establecer que esta es correcta.
3. Revisar que la criba no se encuentre obstruida por ningún material o plástico triturado.
4. Quitar la criba de la trituradora y limpiarla completamente hasta que no tenga ningún material entre los agujeros.
5. Medir los agujeros centrales con un vernier para determinar que la dimensión de estos todavía es la correcta.
6. Si las medidas son correctas, colocarla nuevamente en el porta criba.
7. Si los agujeros ya no tienen las dimensiones correctas al igual que si hay mucha distancia entre el borde de la criba y las cuchillas, esta se debe reemplazar.

Lubricación de chumaceras

Es importante realizar el mantenimiento de las chumaceras colocadas en el eje. Principalmente el mantenimiento que se debe realizar es la lubricación de los rodamientos cada cierto tiempo. Desde que se compra el rodamiento, este viene lubricado con la grasa SKF LGEP2. Es necesario que se lubrique cada 7,500 horas. Estos están diseñados para vida infinita siempre y cuando se haga el correcto mantenimiento.

Herramientas y equipo

1. Bomba de engrase



2. Grasa LGMT 3 SKF



Procedimiento

1. Cuando llegue el tiempo de lubricar los rodamientos es necesario limpiar el *fitting* del rodamiento y sus alrededores.
2. Colocar la bomba de engrase en el *fitting*.
3. Se utiliza el método de renovar la grasa por lo cual se bombea la grasa hasta que la nueva reemplaza la grasa vieja.
4. Limpiar con un trapo de microfibra cualquier exceso de grasa.

MÓDULO DE POTENCIA

Guía de frecuencia de mantenimiento general de motor

El siguiente cuadro indica cada cuánto se deben realizar los tipos de mantenimiento generales del motor, esta es una guía de apoyo y solamente involucra los mantenimientos más comunes para un motor diésel estacionario enfriado por aire. VERIFICAR SIEMPRE EL MANUAL DEL FABRICANTE DEL MOTOR.

 Revisar/ Añadir  Reemplazar						
ELEMENTO	HORAS DE OPERACIÓN					
	Todos los días	Cada 20 – 50 h	Cada 100 h	Cada 200 h	Cada 500 h	Cada 1,000 h
Revisar el ajuste de tornillos y pernos					 Pernos de base	
Revisar y añadir aceite al motor						
Añadir diésel						
Cambio de aceite		 1era vez	 2da en adelante			
Limpiar y reemplazar filtro de aceite						 Según requerimiento
Filtro de aire	Según condiciones de operación podría reemplazarse de forma más frecuente					
Filtro de combustible						
Revisar fugas de aceite o diésel						
Revisar boquilla de inyección						
Revisar bomba de inyección						
Ajustar válvulas de admisión y escape		 1ra			 2da en adelante	
Reemplazar anillo de pistón						
Limpieza de batería	Limpiar con regularidad (según uso) y revisar estado mensualmente 					

*NOTA: SE UTILIZA COMO BASE EL MANTENIMIENTO DE MOTOR YANMAR L40 AIR COOLED

Ajuste de tornillos y pernos

El ajuste de pernos se debe revisar con una inspección rápida cada día. Verificar que no existan tornillos flojos en las partes unidas a las poleas, base de motor y el resto de los elementos del motor. Los pernos unidos a la base de motor deberán apretarse cada 500 hrs.

Herramientas y equipo

1. Llave matraca o de trinquete



2. Juego de copas



3. Torquímetro (opcional)



4. Trapo de microfibra



5. Set de llaves combinadas (opcional)



6. Desarmador y puntas de desarmador



Procedimiento

1. Verificar si los pernos se encuentran flojos, apretarlos lo suficiente con el *ratchet* o atornillador.
2. Si se observa suciedad en los pernos, utilizar herramienta adecuada para remover pernos o tornillos.
3. Luego de remover los pernos, limpiar la superficie con el trapo, suciedad que se encuentre en los pernos y tornillos.
4. Colocar de nuevo los pernos y tornillos, ajustarlos con las herramientas correspondientes, apretar solamente lo suficiente para que quede apretado.
5. Se recomienda usar un torquímetro para el ajuste de los pernos que se unen a la base del motor. En caso se desee usar un torquímetro estos son los pasos a seguir:

- a. Consultar el manual de fabricante, del motor, el torque necesario al que se deben apretar los tornillos.
- b. Configurar el torque en el torquímetro ya sea en Nm o en Lbft, dependiendo el torquímetro que se tenga.



- c. Apretar los pernos hasta que se escuche un *click*, esto significa que se ha llegado al valor deseado.

Revisar y añadir aceite al motor

Esto se deberá revisar de forma rápida cada día de operación de la máquina, para asegurar un correcto funcionamiento de la trituradora.

Herramientas y equipo

1. Aceite para motor diésel adecuado



2. Trapo de microfibra



3. Embudo



Procedimiento para revisar y añadir aceite al motor

1. Ubicar la varilla de medición de aceite
2. Retirar varilla de medición de aceite del motor y limpiar el trapo
3. Introducir la varilla de medición en el motor
4. Retirar nuevamente la varilla de medición de aceite, verificar que la marca de aceite se encuentre entre los dos agujeros. Si se encuentra cercano al agujero inferior se puede añadir más aceite para mantener el nivel más cercano al agujero que indica el nivel máximo.



5. Añadir el aceite recomendado por el manual del fabricante del motor. Ubicar el tapón de aceite y removerlo con la mano, utilizar un embudo para verter el aceite del motor.

Cambio de aceite y reemplazo de filtro

Realizar el cambio de aceite la primera vez entre 20 y 50 horas de funcionamiento y para el resto de veces, cada 100 horas en adelante. Esta es una recomendación basada en manuales de mantenimiento de motores diésel de enfriamiento por aire, sin embargo, **SIEMPRE** revisar el manual de operación del fabricante.

Herramientas y equipo

1. Aceite de motor diésel: Consultar manual de fabricante



2. Llave de tubo o llave combinada



3. Llave de banda (opcional)



4. Recipiente para drenado de aceite (profundidad según tanque de aceite)



5. Embudo



6. Filtro de aceite nuevo



Procedimiento para cambio de aceite y filtro de aceite

1. Asegurarse que el motor está frío: el motor deberá estar completamente frío, preferiblemente realizar esta operación sin antes haber encendido la máquina o esperar por lo menos 1 hora después de que se haya apagado el motor.
2. Ubicar la válvula de drenaje de aceite, que suele estar en la parte inferior del motor. Revisar el manual del fabricante para ubicar según modelo de motor que se tiene.
3. Colocar el recipiente debajo de la válvula de drenaje de aceite.
4. Abrir la válvula de drenaje de aceite con una llave mixta y esperar a que se llene el recipiente con aceite sucio y cerrar la válvula.
5. Mover el aceite viejo del recipiente a otro envase que sea capaz de cerrarse, desechar el aceite de forma responsable al camión de basura local o si existe un centro de reciclaje de aceite, enviarlo a esta institución. **NO TIRAR EL ACEITE A UN DRENAJE O DESECHAR CON EL RESTO DE BASURA ORDINARIA.**
6. Remover el filtro de aceite usado: utilizar una mano para remover el filtro de aceite, en caso de que esté ajustado, usar una llave de banda u otra herramienta para asistir esta acción (depende de la geometría del filtro).
7. Limpiar la superficie donde se colocará el nuevo filtro, agregar el nuevo filtro mediante un embudo, aplicar un poco de aceite con la mano en la parte superficial del filtro de aceite.



8. Instalar el filtro nuevo a mano, apretarlo lo suficiente para que no existan fugas, pero no forzar el ajuste del filtro.
9. Agregar aceite nuevo al motor, tomar el aceite que indica el manual de fabricante del motor, ubicar donde se vierte el aceite y llenar el tanque de aceite mediante un embudo, verificar que la cantidad de aceite que se utiliza es la estipulada por el fabricante del motor.
10. Revisar el nivel de aceite con la varilla de medición (ver página 12).

Reemplazar filtro de aire

El reemplazo del filtro de aire del motor diésel se debe cambiar cada 500 horas de mantenimiento. Revisar el manual de fabricante para indicar el tipo de filtro necesario que se debe añadir.

Herramientas y equipo

1. Desarmador con puntas y copas



2. Filtro de aire nuevo



Procedimiento para reemplazo de filtro de aire

1. Asegurarse que el motor está frío: el motor deberá estar completamente frío, preferiblemente realizar esta operación sin antes haber encendido la máquina o esperar por lo menos 1 hora después de que se haya apagado el motor.
2. Ubicar dónde se encuentra el filtro de aire del motor, revisar manual de fabricante del motor. Este suele estar en la parte superior del motor.
3. Retirar el filtro viejo, para esto utilizar las herramientas como el desarmador de puntas y copas en caso de ser necesario, depende del tipo de motor que se compre.
4. Reemplazar el filtro de aire y atornillar los sujetadores necesarios para asegurar el filtro de aire nuevo.
5. Encender el motor y verificar que esté funcionando correctamente.

Reemplazo de filtro de combustible

El filtro de combustible deberá revisarse cada 500 horas y reemplazar cada 1,000 horas.

Herramientas y equipo

1. Llave de tubo mixtas o combinadas



2. Filtro de combustible nuevo, revisar manual de fabricante



Procedimiento para cambio de filtro de combustible

1. Asegurarse que el motor está frío: el motor deberá estar completamente frío, preferiblemente realizar esta operación sin antes haber encendido la máquina o esperar por lo menos 1 hora después de que se haya apagado el motor.
2. Ubicar el filtro de combustible, este se encuentra en la línea de suministro de combustible que se une al motor.
3. Retirar filtro de combustible, aflojar las mangueras que conecta la línea de suministro de combustible, usar una llave de tubo para realizar este proceso. Tener cuidado con salida de combustible que se encuentre en estos tubos



4. Instalar el nuevo filtro de combustible en la línea de suministro de combustible, luego apretar los elementos de unión de la línea de combustible con la llave de tubo.
5. Verificar el funcionamiento del motor, asegurarse que no existan fugas de combustible en el motor.

Revisión de fugas de aceite o combustible

La revisión de posibles fugas de aceite o combustible se debe realizar todos los días, para mantener un funcionamiento correcto del motor.

Herramientas y equipo

1. Desarmador de puntas y copas



2. Llave de tubo combinada



Procedimiento para revisión de fugas de aceite o combustible

1. Revisión visual diaria del motor: en periodos de operación de la máquina observar si existen fugas visibles de aceite o combustible en todas las áreas cercanas del motor, en la base del motor en caso de goteo o en manchas que indicarían una fuga de estos fluidos.
2. Revisar nivel de aceite (ver página 12) identificar si existe un nivel menor de aceite debido a uso de la máquina o si esto podría indicar una fuga.
3. Revisar mangueras y filtro de combustible. Apretar las mangueras de línea de suministro de combustible en caso de fugas y revisar el filtro de combustible (ver página 16). Si el filtro de aceite tiene manchas indica una posible fuga de combustible.
4. Revisar juntas del motor, lugares en donde debería de pasar el aceite alrededor del motor, revisar el manual de fabricante para ubicar estos espacios.
5. En caso de tener una fuga excesiva de aceite o combustible, reportar el problema y consultar con un taller de mantenimiento de motores diésel estacionarios.

Revisión de boquilla de inyección

La boquilla de inyección deberá revisarse cada 500 horas y reemplazarse cuando sea necesario según el estado del motor.

Herramientas y equipo

1. Llaves de tubo combinadas



2. Desarmador de puntas y copas



3. Cepillo



4. Líquido limpiador de boquillas



5. Boquilla de inyección



Procedimiento de revisión de boquilla de inyección

1. Asegurarse que el motor está frío: el motor deberá estar completamente frío, preferiblemente realizar esta operación sin antes haber encendido la máquina o esperar por lo menos 1 hora después de que se haya apagado el motor.
2. Desconectar la batería del motor, si no se desconecta hay riesgo de electrocución.
3. Ubicar la boquilla de inyección, usualmente están en la parte superior del motor, depende del modelo exacto del motor, revisar el manual del fabricante.
4. Desconectar la manguera de combustible que se conecta en la boquilla de inyección, para eso aflojar los ajustes con una llave de tubo.
5. Remover la boquilla de inyección
6. Revisar si existe desgaste en la punta de la boquilla, si esta se encuentra sucia, utilizar el cepillo y limpiador de boquillas para remover la contaminación.
7. Si la boquilla se encuentra severamente dañada, colocar una nueva.
8. Conectar el tubo de combustible y reconectar la batería
9. Encender el motor y verificar que esté funcionando correctamente.

Revisión de bomba de inyección

La bomba de inyección, al igual que las boquillas de inyección, deberá revisarse a las 500 horas de funcionamiento, Revisar el manual del fabricante para ubicar las piezas exactas que deben removerse para revisar la bomba.

Herramientas y equipo

1. Llaves de tubo combinadas



2. Desarmador de puntas y copas



Procedimiento

1. Realizar el procedimiento con el motor apagado.
2. Ubicar la bomba de inyección de combustible.
3. Desconectar las mangueras conectadas a las líneas de suministro de combustible.
4. Desconectar cualquier tipo de cable que esté unido a la bomba de inyección.
5. Limpiar bomba de inyección con el equipo recomendado según el manual de las instrucciones del fabricante.
6. Revisar de forma visual los elementos de la bomba, buscar daños o indicios de desgaste
7. Remover la bomba de inyección.
8. Verificar que las partes mecánicas asociadas a la bomba se mueve con libertas, identificar si existe fricción en los componentes.
9. Verificar las líneas de suministro de combustibles (ver página 16 y 17).
10. Instalar de nuevo la bomba seguir las instrucciones del fabricante.
11. Encender motor y anotar si este funciona de la forma esperada.

Ajuste de válvulas de admisión y de escape de motor

Este proceso se deberá realizar cada 500 horas de funcionamiento de la máquina. Sin embargo, el primer chequeo deberá hacerse entre las 20 y 50 horas de funcionamiento para verificar que todo esté bien.

Herramientas y equipo

1. Llaves de tubo combinadas



2. Desarmador de puntas y copas



3. Válvula de admisión o escape nuevas (en caso de que deban ser reemplazadas)



Procedimiento de ajuste de válvula de admisión y escape de motor

1. Verificar que el motor está apagado, desconectado de la batería, además debe estar frío.
2. Desensamblar la tapadera de culata para poder acceder a la ubicación de las válvulas de admisión y escape. Usar en todo momento el manual del fabricante del motor, remover las piezas en el orden correcto y el equipo adecuado para este proceso.
3. Identificar la válvula de admisión y escape, esto estará indicado en el manual del fabricante del motor.
4. Girar el motor manualmente para ubicar el pistón en la parte inferior del cilindro.
5. Utilizar las herramientas indicadas en el manual del fabricante para ajustar la posición y holgura de las válvulas.
6. Revisar si las válvulas no tienen signos de desgaste, daños o golpes. Revisar que los resortes de las válvulas no estén rotos. Finalmente revisar que las guías de las válvulas de admisión y escape estén lubricadas y en buen estado.
7. En caso de que las válvulas estén severamente dañadas, reemplazarlas, utilizar el manual de motor para realizar este proceso correctamente.
8. Colocar de nuevo la tapadera de culata y ensamblar el resto de las partes al motor. Conectar la batería.
9. Encender el motor para verificar que está funcionando correctamente.
10. Nota: En caso de que no se comprenda con totalidad el manual del fabricante del motor para el reemplazo o ajuste de la válvula y admisión y escape de motor, consultar a un taller mecánico.

Reemplazo de anillo de pistón

Este deberá realizarse cada 1,000 horas de operación. Usar el manual de fabricación para este proceso.

Herramientas y equipo

1. Llave de tubo combinadas



2. Desarmador con puntas y copas



3. Cepillo



4. Anillos de pistón nuevos



5. Instalador de anillos del pistón

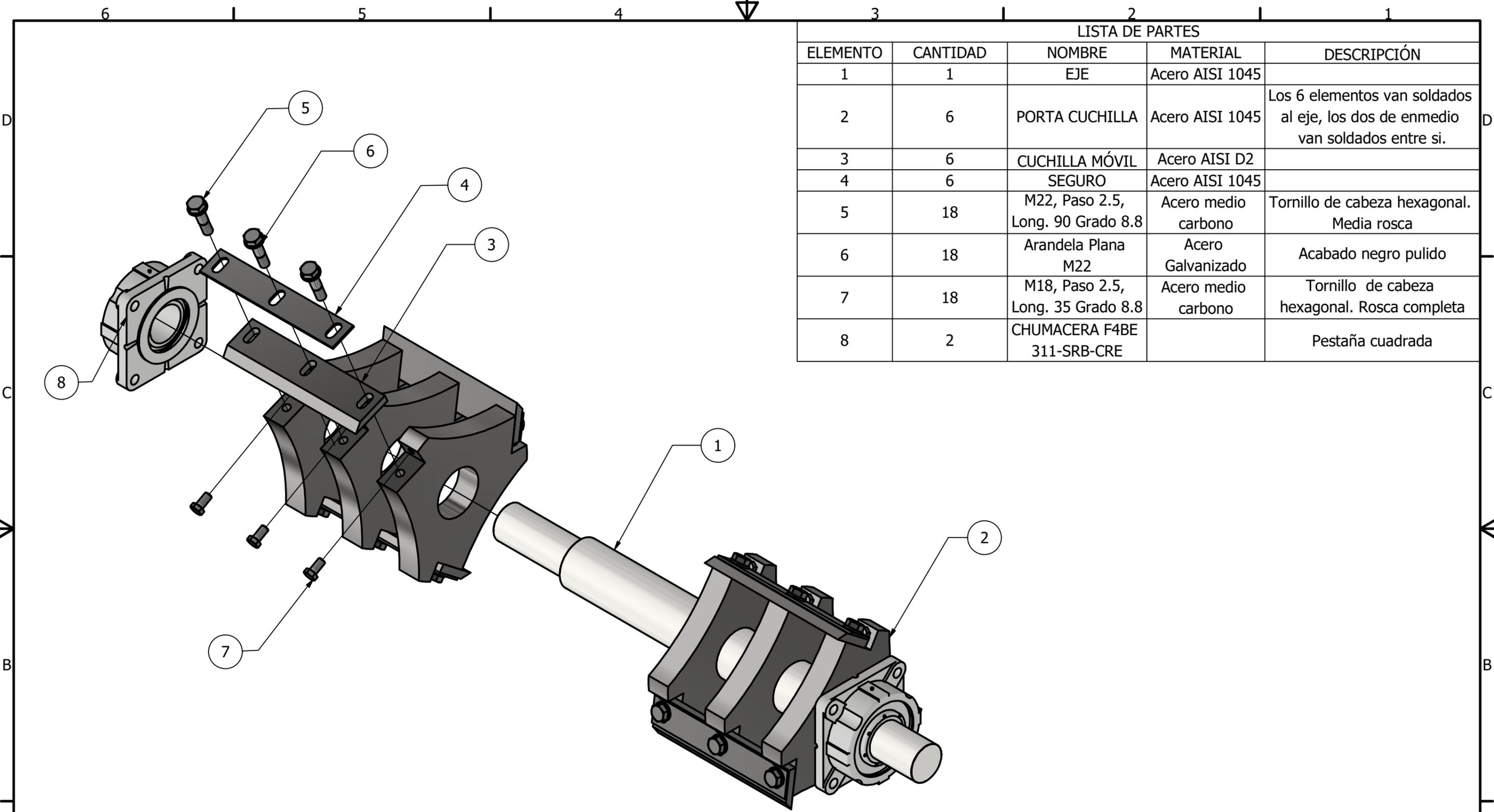


6. Aceite lubricante



Procedimiento para reemplazo de anillo de pistón

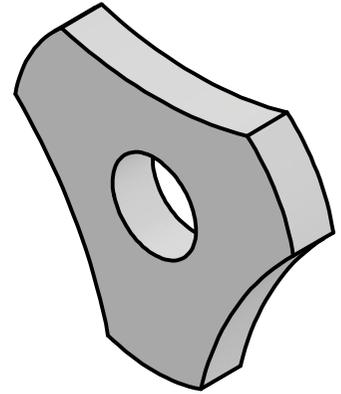
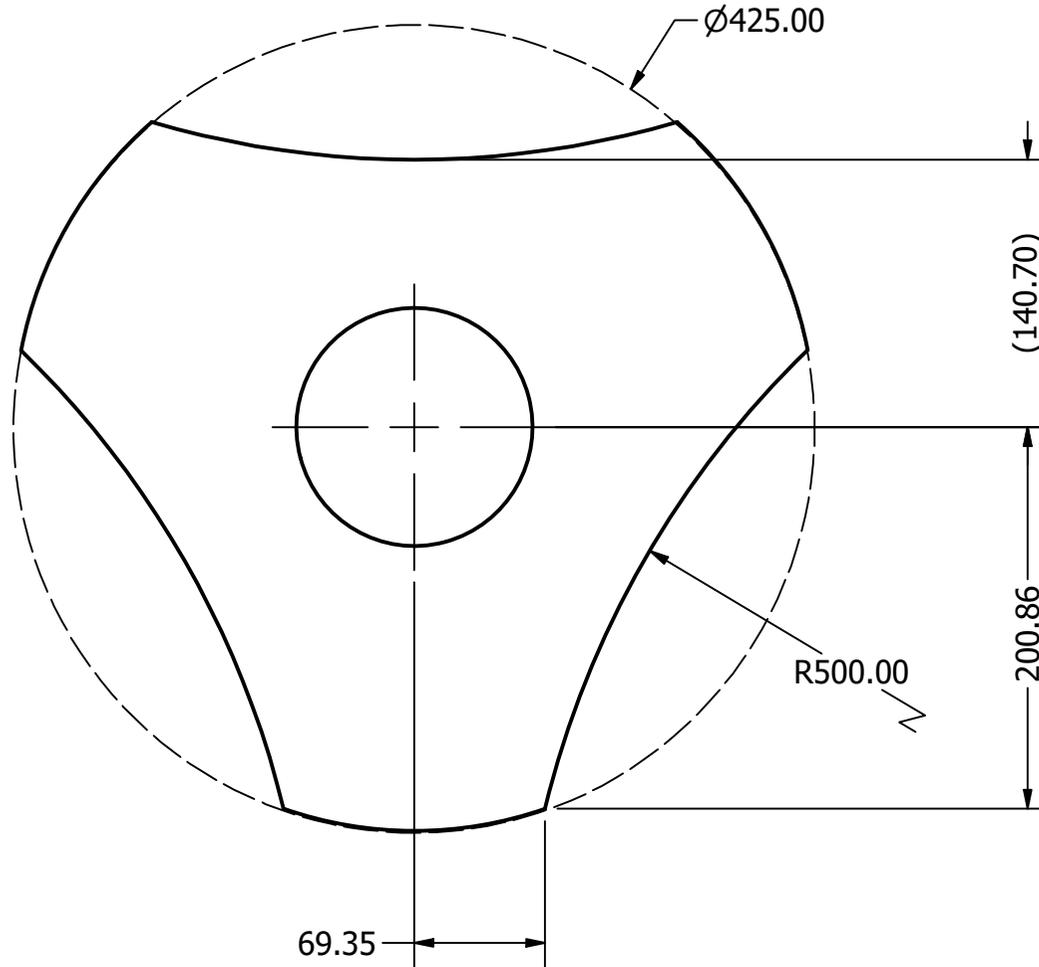
1. El motor deberá estar apagado, frío y con la batería desconectada.
2. Remover las piezas necesarias para ubicar el pistón del motor. Utilizar las herramientas de mano convencionales y el manual del motor para realizar este proceso correctamente.
3. Remover el pistón del motor
4. Tomar la pinza para remover e instalar los anillos de pistón del motor.
5. Retirar el anillo de pistón viejo
6. Limpiar las ranuras en donde se instalan los anillos, utilizar un trapo de microfibra o un cepillo para este paso.
7. Instalar los nuevos anillos, para esto seguir las instrucciones del manual del fabricante del motor.
8. Revisar el ajuste del anillo de pistón al motor, seguir las instrucciones del manual del fabricante
9. Lubricar los anillos con el aceite correspondiente y colocar el pistón en su lugar.
10. Ensamblar todas las piezas del motor nuevamente.
11. Encender el motor y verificar que todo esté en orden



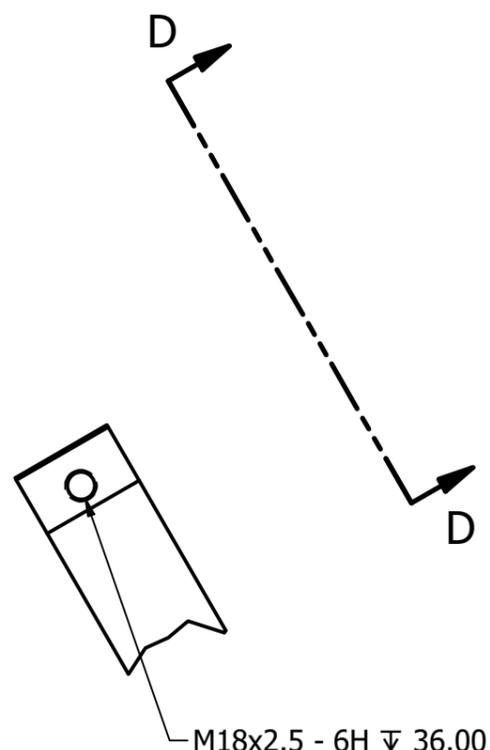
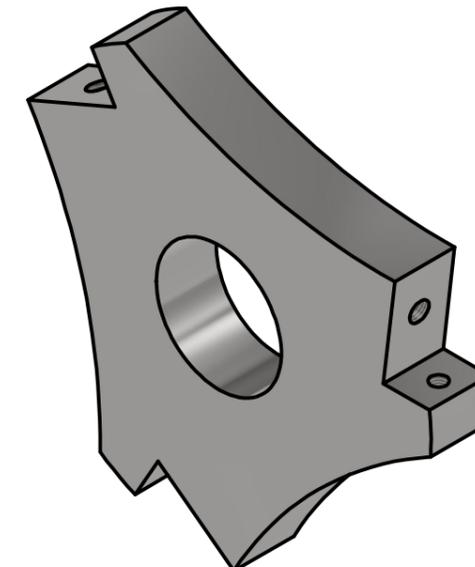
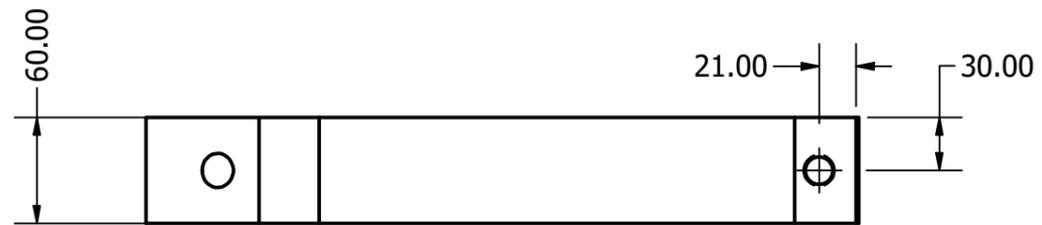
LISTA DE PARTES				
ELEMENTO	CANTIDAD	NOMBRE	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
1	1	EJE	Acero AISI 1045	
2	6	PORTA CUCHILLA	Acero AISI 1045	Los 6 elementos van soldados al eje, los dos de enmedio van soldados entre si.
3	6	CUCHILLA MÓVIL	Acero AISI D2	
4	6	SEGURO	Acero AISI 1045	
5	18	M22, Paso 2.5, Long. 90 Grado 8.8	Acero medio carbono	Tornillo de cabeza hexagonal. Media rosca
6	18	Arandela Plana M22	Acero Galvanizado	Acabado negro pulido
7	18	M18, Paso 2.5, Long. 35 Grado 8.8	Acero medio carbono	Tornillo de cabeza hexagonal. Rosca completa
8	2	CHUMACERA F4BE 311-SRB-CRE		Pestaña cuadrada

TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± 0.1 .XX ± 0.02 .XXX ± 0.001 ANGULAR ± 1	DIBUJADO POR ANDREA CHINCHILLA 1/04/2022 FECHA	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 chi18114@uvg.edu.gt	
	DISEÑADO POR ANDREA CHINCHILLA 1/04/2022 FECHA		TÍTULO: EXPLOSIÓN EJE SITEMA DE TRITURACIÓN
	REVISADO POR RONY HERRARTE FECHA		NÚMERO DE DIBUJO: 1
APROBADO POR RONY HERRARTE FECHA	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO SISTEMA DE TRITURACIÓNN	FORMATO A3	
MATERIAL VER LP TRATAMIENTO MASA: N/A	 TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN	ESCALA: 1 : 8 UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 12 REV 0	

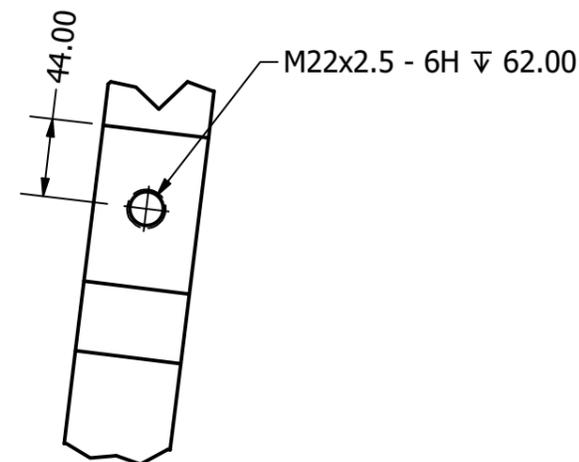
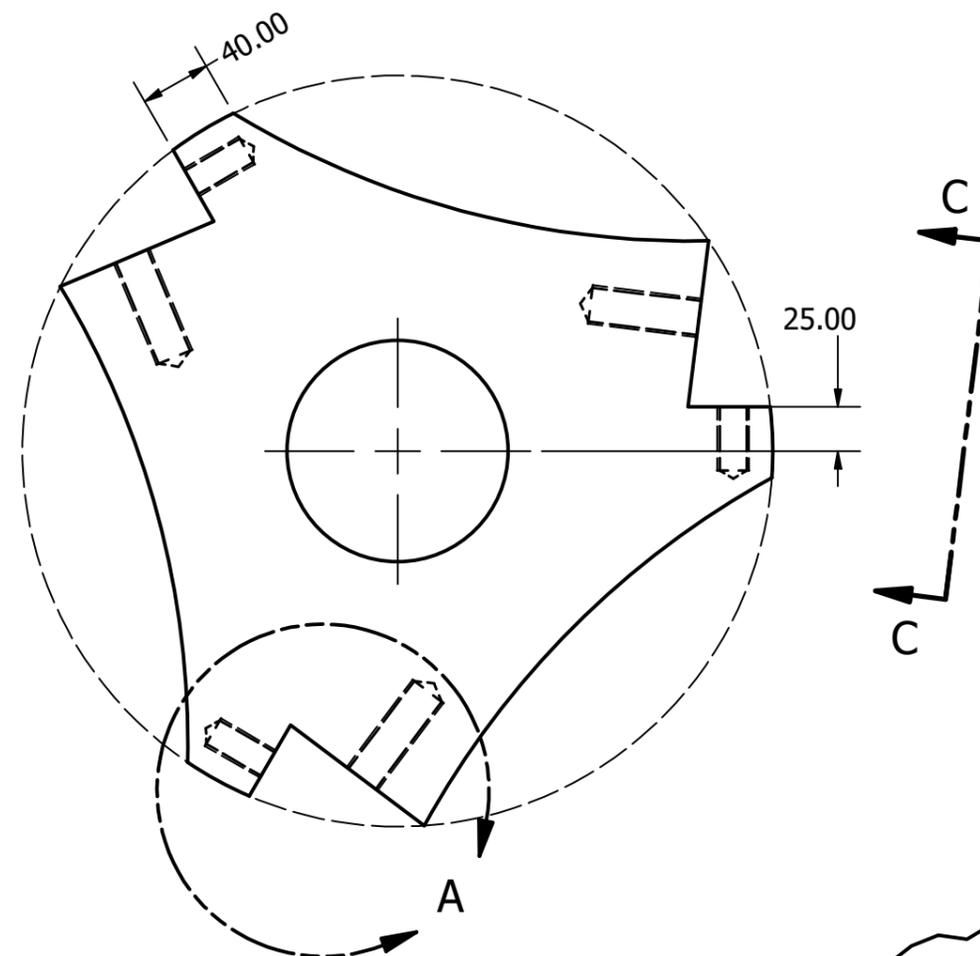
NOTA 1: SE INICIA CON UNA
GEOMETRÍA CIRCULAR DE
425.00 mm DE DIÁMETRO



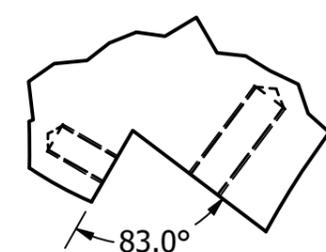
TÍTULO:		BASE PORTA CUCHILLA	
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1 : 4	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 2 DE 12		REV 0



VISTA D-D
ESCALA 1:4



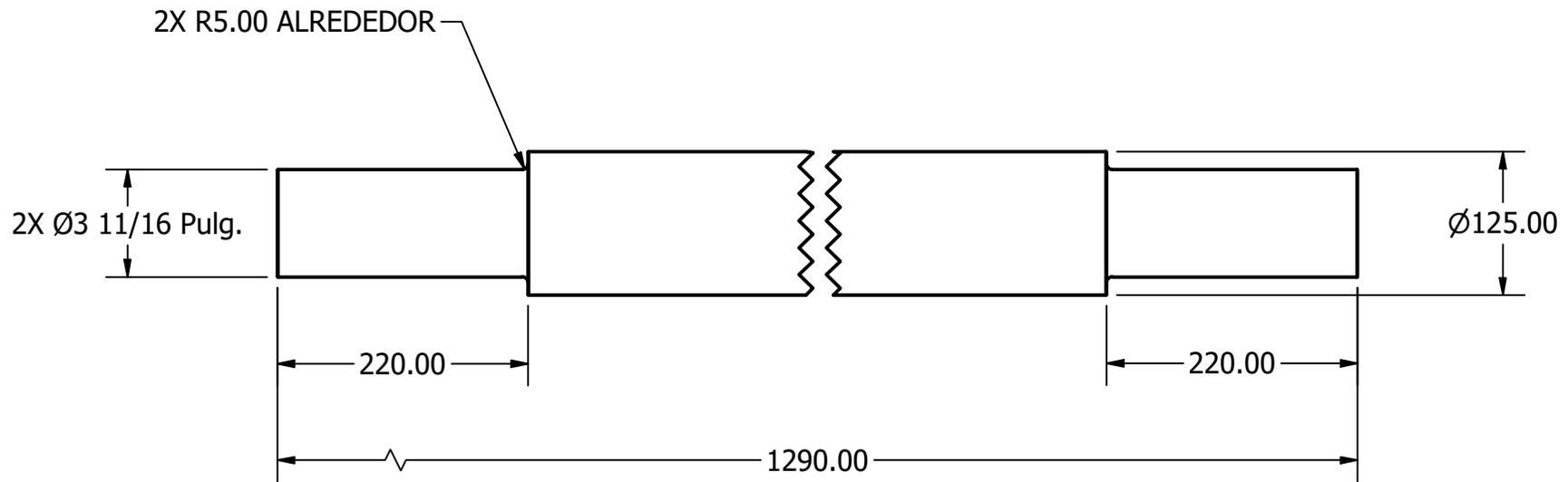
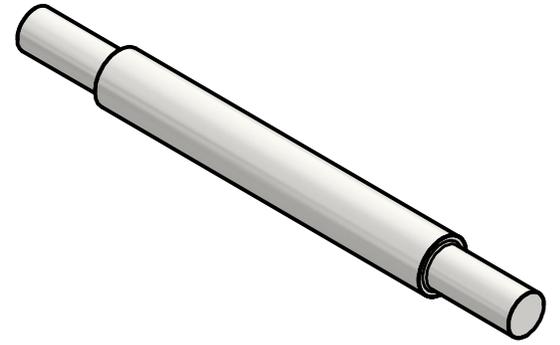
VISTA C-C
ESCALA 1:4



DETALLE A
ESCALA 1 / 4

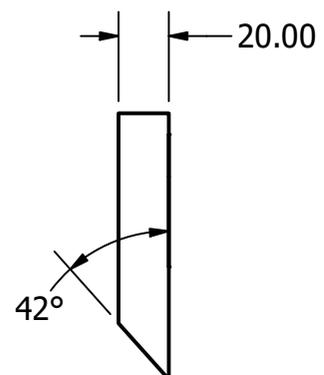
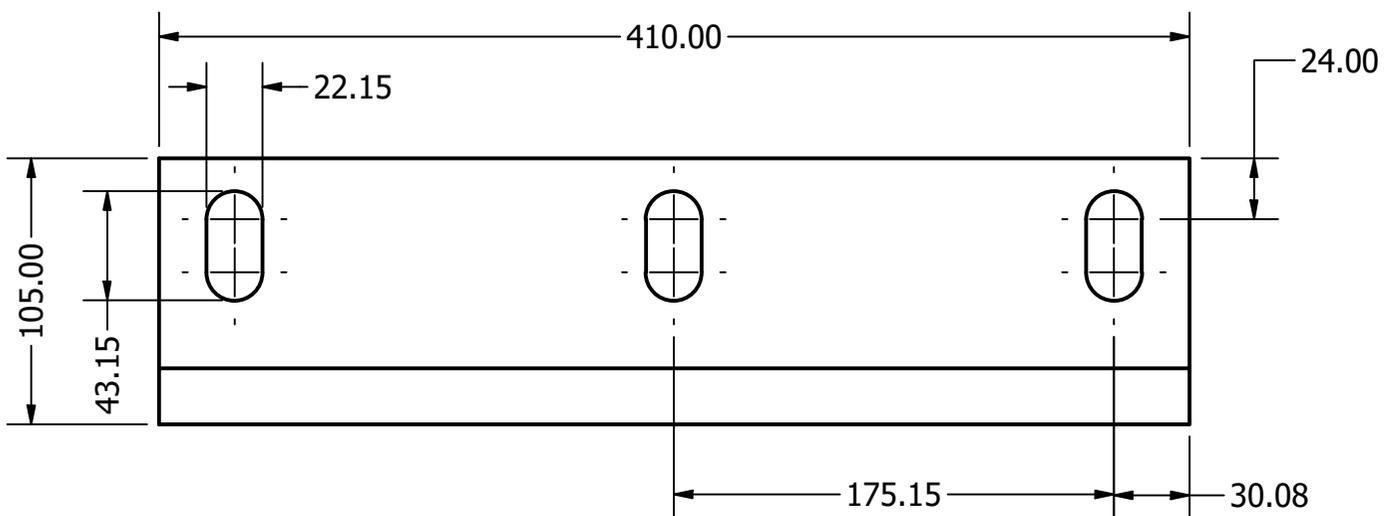
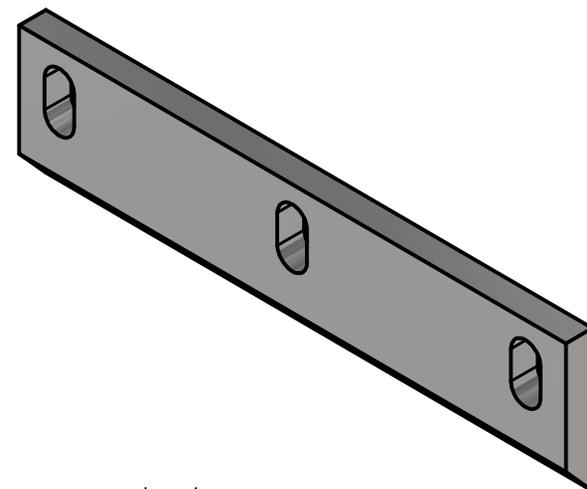
NOTA 1: PRIMERO SE REALIZAN LAS 3 CURVATURAS Y LUEGO EL DETALLE A

TÍTULO: PORTA CUCHILLA		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO A3	ESCALA: 1 : 4 PÁGINA 3 DE 12	UNIDADES: mm REV 0



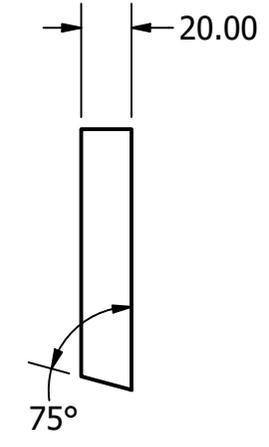
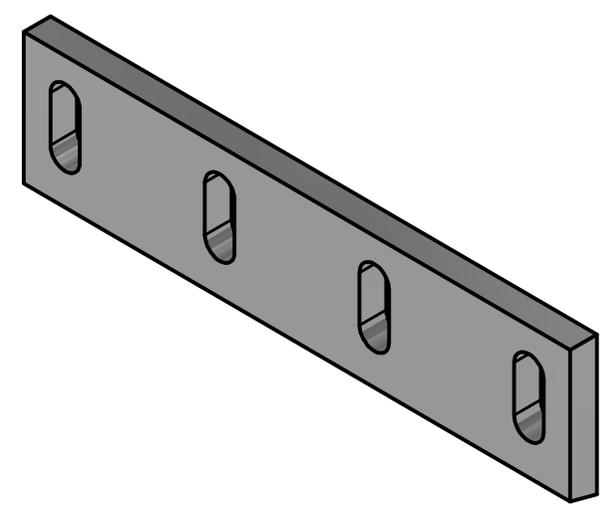
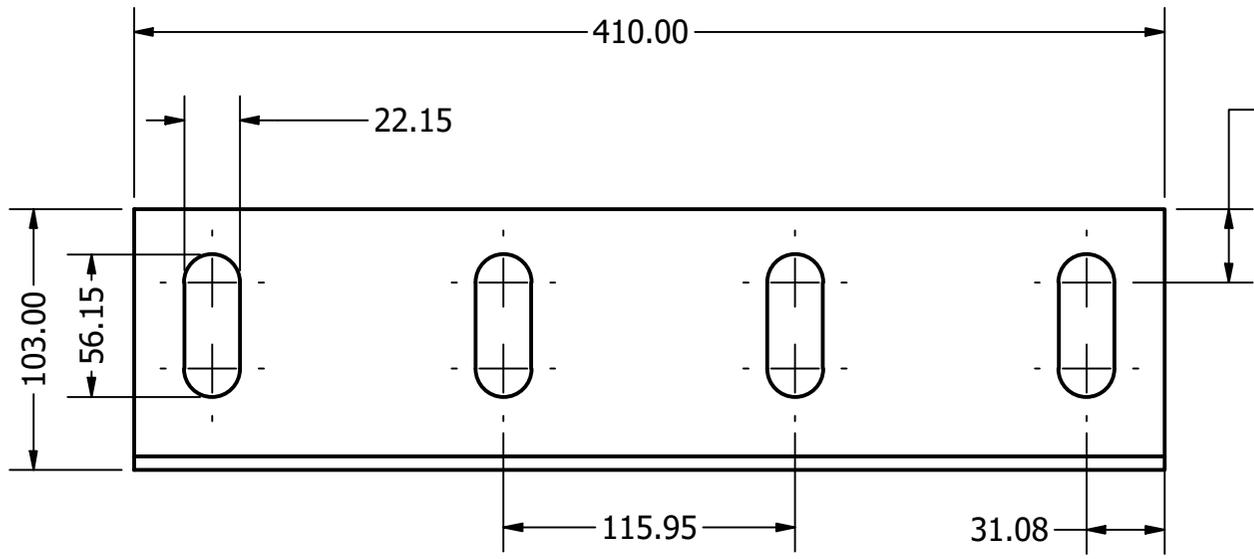
NOTA 1: REMOVER BORDES
AFILADOS

TÍTULO:		
EJE		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1 : 6	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 4 DE 12	REV 0



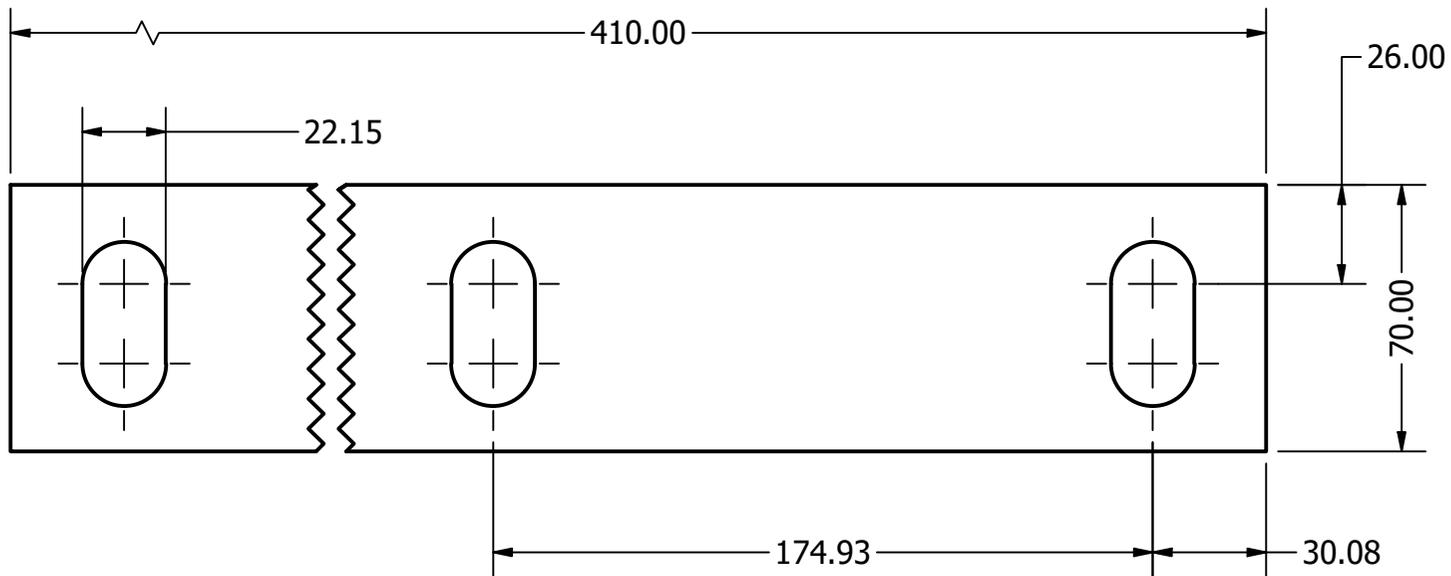
NOTA 1: ES LA MISMA DISTANCIA ENTRE LOS AGUJEROS

TÍTULO:		CUCHILLA MÓVIL	
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1 : 3	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 5 DE 12		0



NOTA 1: ES LA MISMA DISTANCIA ENTRE LOS AGUJEROS

TÍTULO:		CUCHILLA FIJA	
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1 : 3	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 6 DE 12	REV	0

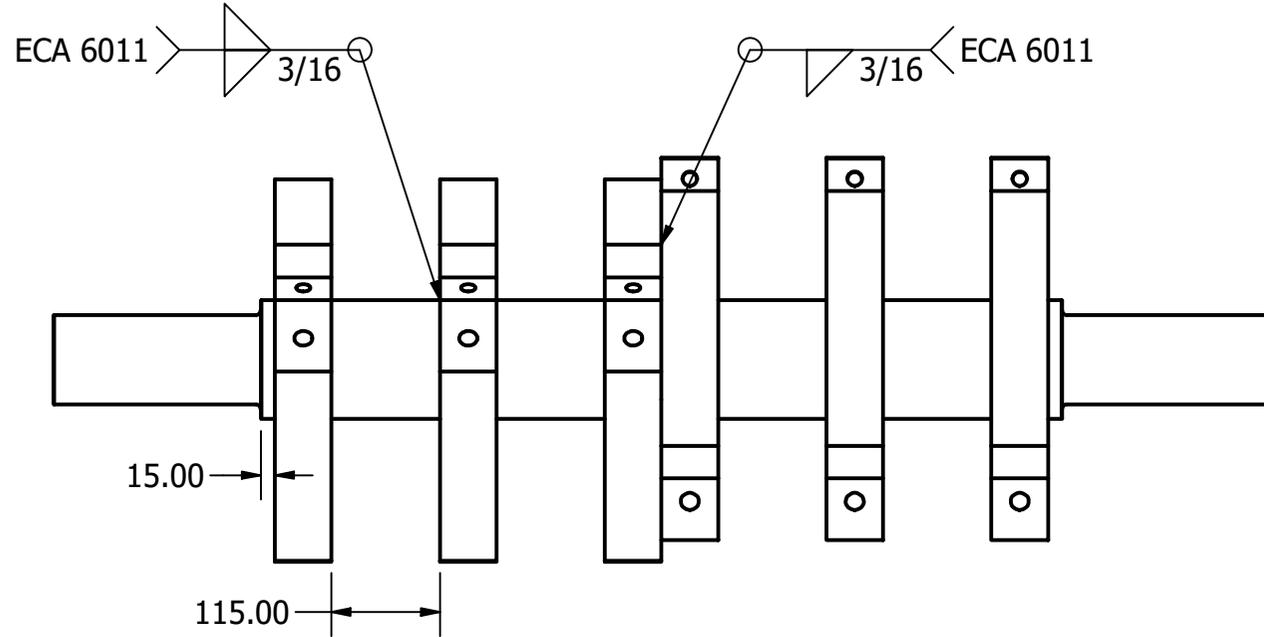


NOTA 1: LA DISTANCIA ES LA MISMA ENTRE AGUJEROS

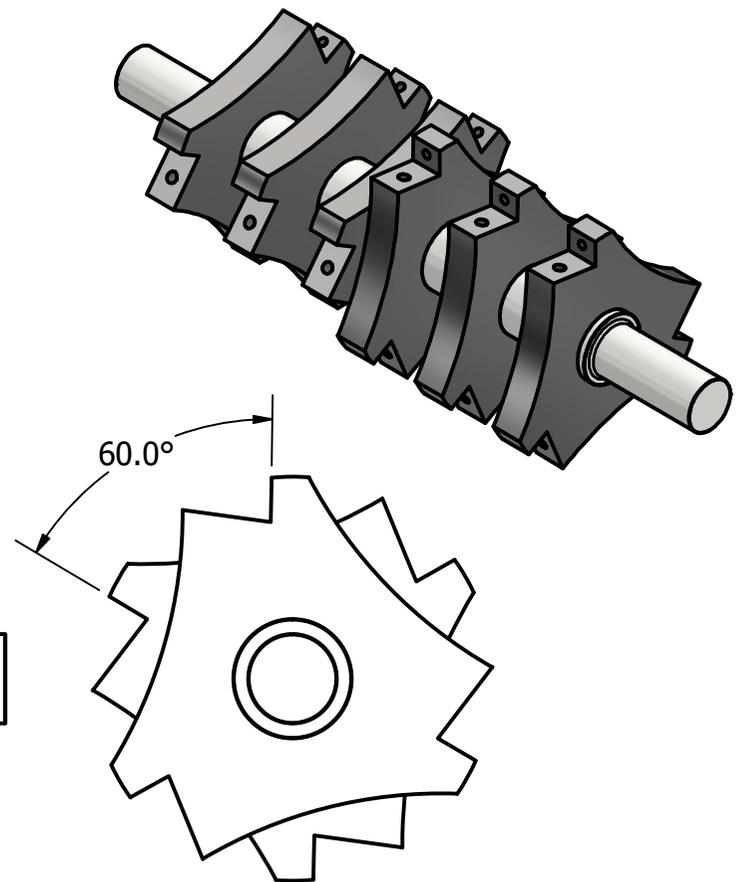
NOTA 2: USAR PLACA DE 5 mm DE GROSOR

TÍTULO:		
SEGURO		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1 : 2	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 7 DE 12	REV 0

NOTA 3: SE UTILIZA EL MISMO TIPO DE SOLDADURA EN TODOS LOS PORTACUCHILLAS



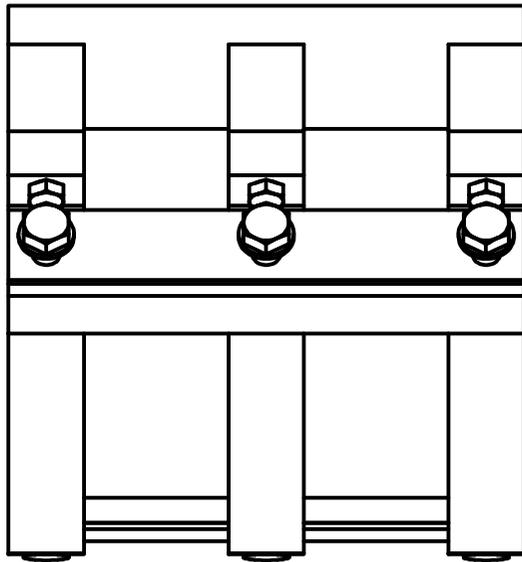
NOTA 1: ES LA MISMA DISTANCIA ENTRE CADA PORTA CUCHILLA



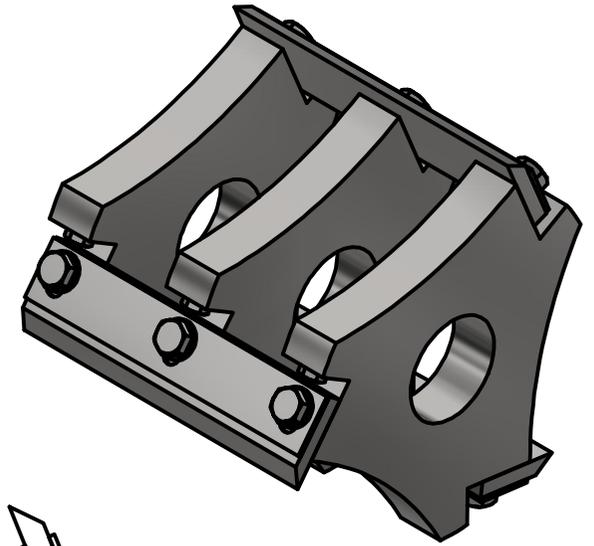
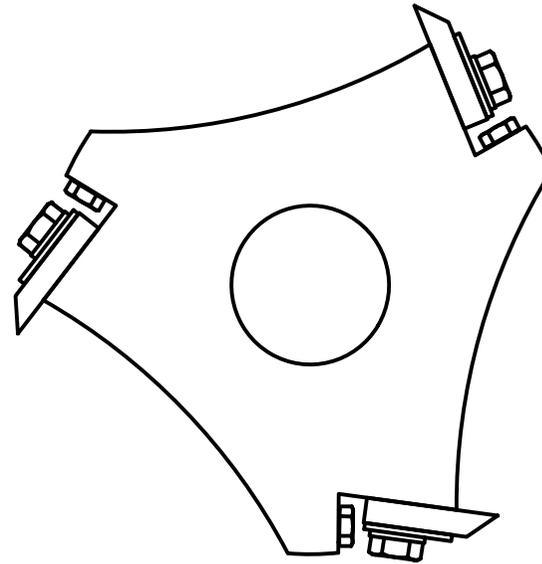
NOTA 2: LOS PRIMEROS 3 PORTA CUCHILLAS ESTÁN ALINEADOS ENTRE SI AL IGUAL QUE LOS PRÓXIMOS 3. ENTRE ELLOS ESTAN GIRADOS 60°

TÍTULO: EJE Y PORTA CUCHILLAS		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1/8	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 8 DE 12	REV 0

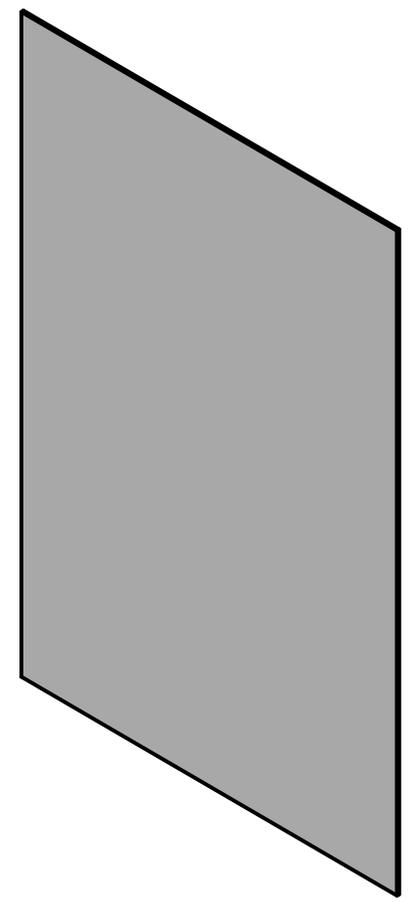
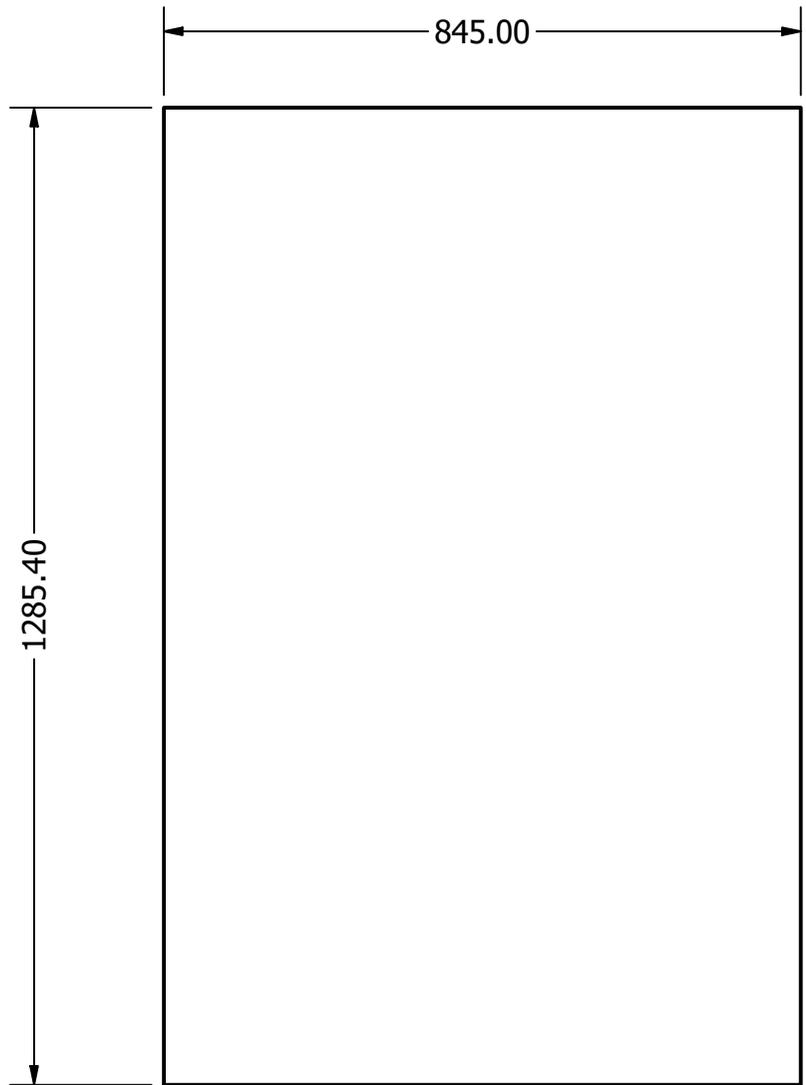
NOTA 1: TENIENDO LOS PORTA CUCHILLAS
ALINEADOS, PRIMERO SE COLOCA LA
CUCHILLA ALINENADO LOS AGUJEROS,
LUEGO SE COLOCA EL SEGURO DE LA MISMA
MANERA Y SE ASEGURAN ESTAS PIEZAS
UTILIZANDO 3 PERNOS



NOTA 2: AL AJUSTAR LAS
CUCHILLAS, EL ESPACIO ENTRE
LAS CUCHILLAS FIJAS Y MÓVILES
DEBE SER DE 0.3 mm.

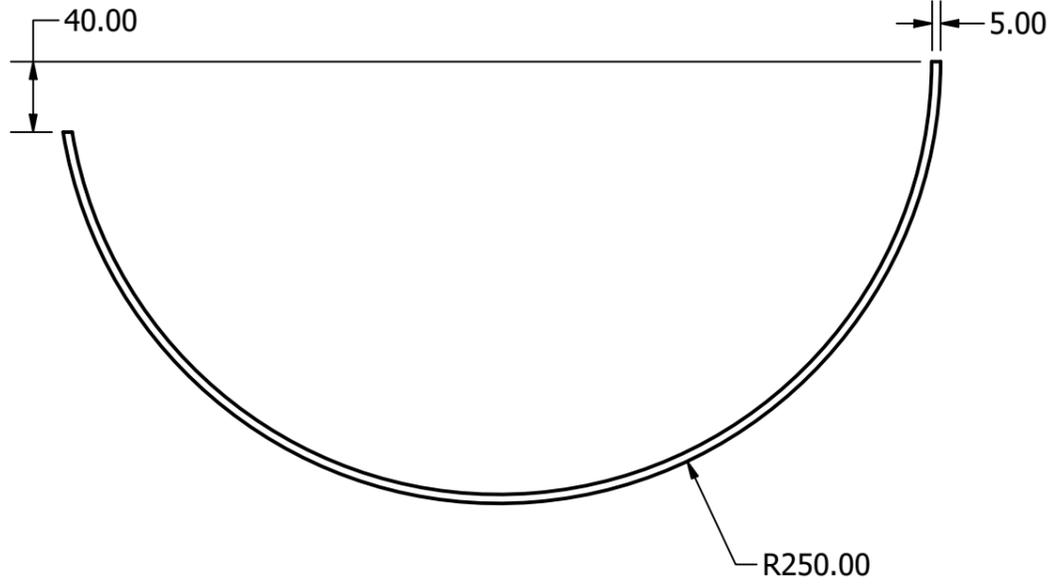
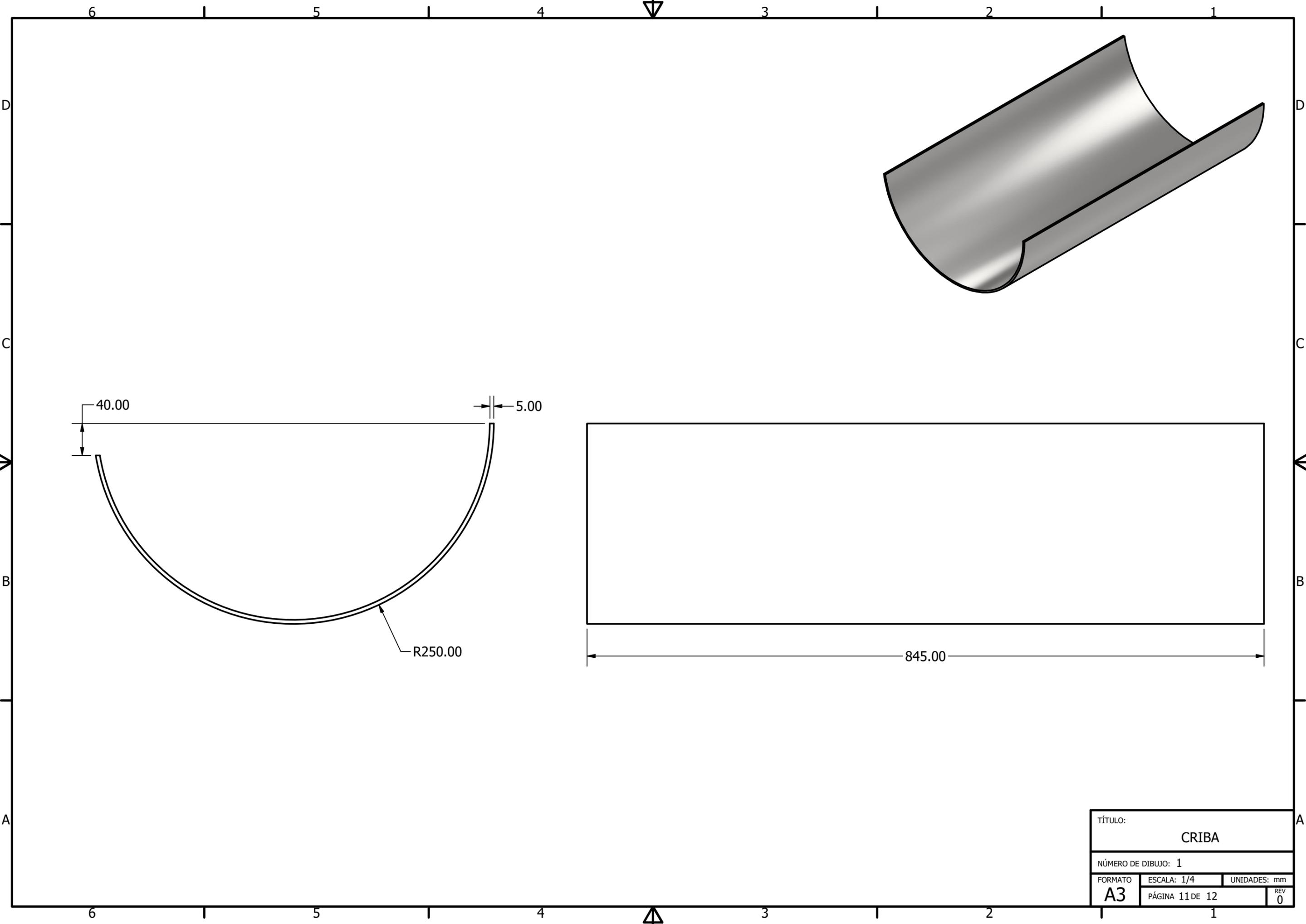


TÍTULO: PORTA CUCHILLAS Y CUCHILLAS		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO A4	ESCALA: 1 : 6	UNIDADES: mm
	PÁGINA 9 DE 12	REV 0

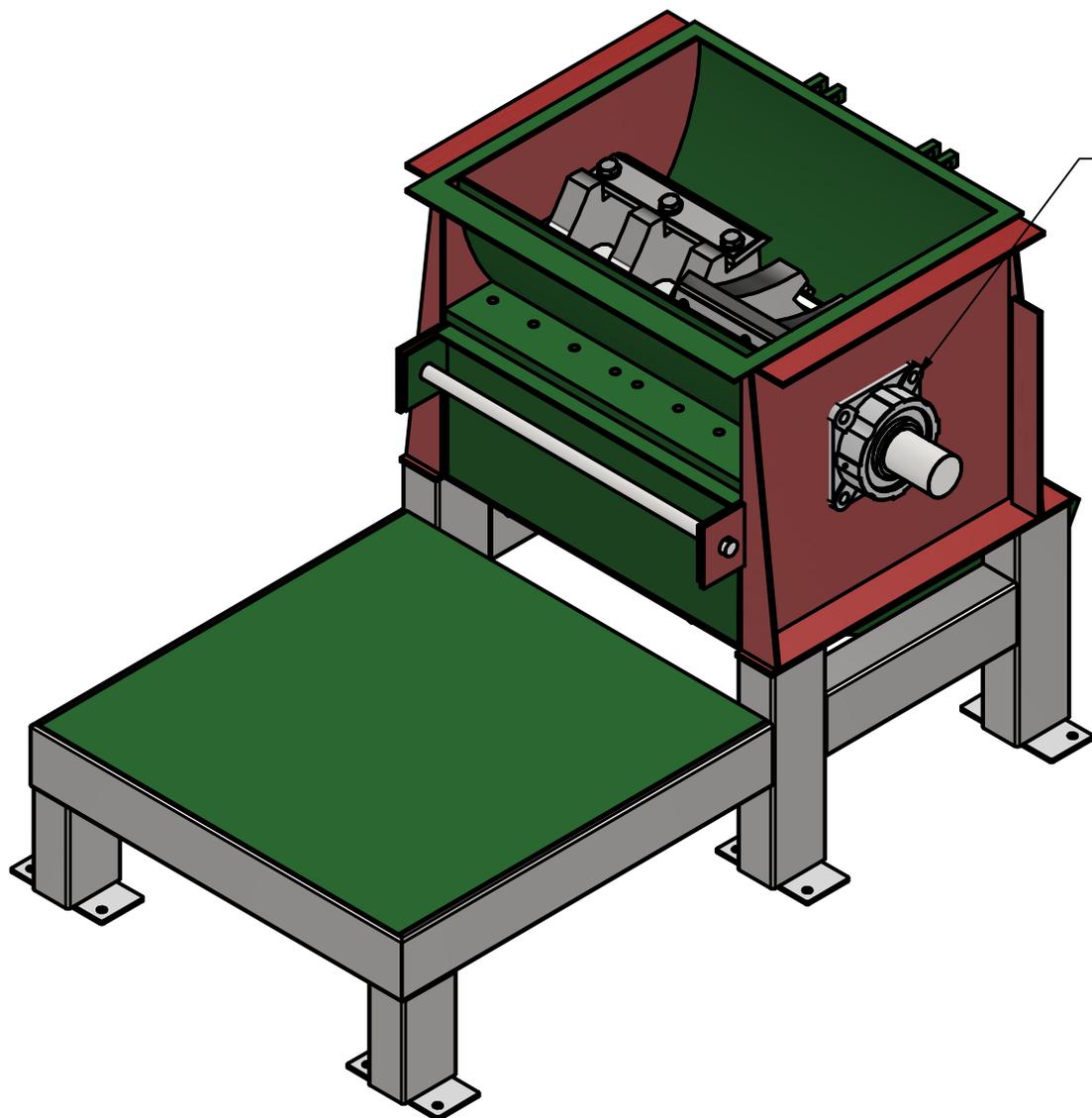


NOTA 1: SE COMPRA UNA
PLANCHA CON AGUJEROS
DE 18 mm DE DIÁMETRO

TÍTULO:		PLANCHA CRIBA	
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1 : 10	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 10 DE 12		0



TÍTULO:		
CRIBA		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm
A3	PÁGINA 11 DE 12	REV 0



NOTA 1: SE NECESITAN 4 TORNILLOS
HEXAGONALES 7/8 PULG - 9 UNC
POR CADA CHUMACERA

NOTA 2: PARA ENSAMBLAR EL EJE
EN LA TRITURADORA SE DEBE
SOLDAR PRIMERO SOLO UNA PARED
LATERAL LUEGO COLOCAR EL EJE Y
POR ÚLTIMO LA SEGUNDA PARED
LATERAL

NOTA 3: LAS CUCHILLAS SE COLOCAN
DESPUÉS DE ENSAMBLAR EL EJE Y LAS
CHUMACERAS A LA TRITURADORA.
PRIMERO LAS FIJAS Y LUEGO LAS
MÓVILES.

TÍTULO: ENSAMBLE CUCHILLA
TRITURADORA

NÚMERO DE DIBUJO: 1

FORMATO ESCALA: 1 : 15 UNIDADES: mm

A4

PÁGINA 12 DE 12

REV

0